



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOD-Z-EN ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY
DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE KAPASİTE- İLETKENLİK -
VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**Esra AKKÖSE
192108002**

2021

GİRESUN

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BOD-Z-EN ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY
DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE KAPASİTE- İLETKENLİK -
VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Esra AKKÖSE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serkan EYMUR

**Aralık 2021
GİRESUN**

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOD-Z-EN ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY
DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE KAPASİTE- İLETKENLİK -
VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra AKKÖSE

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez .././20.. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

..... Dr.
.....
Jüri Başkanı

..... Dr.
.....
Üye

.... Dr.
.....
Üye

..... Dr.
.....
Enstitü Müdürü

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Esra AKKÖSE

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilimsel desteklerini benden esirgemeyen, her türlü olanağı sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Serkan EYMUR'a ve değerli hocam Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bütün destekleri için Ezgi Cemre YAKAN'a ve Gökhan AYDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen ve her zaman yanımda olduklarını bana hissettiren aileme de sonsuz sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ÖZET.....	X
SUMMARY	XI
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1 Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) Yapı	4
2.1.1. İdeal MOS Yapı	5
2.1.1.1. MOS Kapasitansı	9
2.1.1.2. Yığılım Bölgesi	11
2.1.1.3. Tersinim Bölgesi	11
2.1.1.4. Tükenim Bölgesi	12

2.1.2. Gerçek MOS Yapısı	13
2.1.2.1. Arayüzey Durumları.....	14
2.1.2.2. Seri Direnç	15
2.2. Dielektrikler	17
2.2.1. Dielektrik Özellikler	18
2.3. Empedans spektroskopisi	19
2.4. Kapasitans Spektroskopisi	22
2.5. BODIPY Temelli Bileşiklerin Özellikler ve Kullanım Alanları.....	23
 BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1.1. Organik Yarıiletken Malzemenin Hazırlanması Sentezi.....	24
3.1.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi.....	25
3.1.3. BOD-Z-EN Organik Arayüzey Tabakalı Schottky Diyotunun Hazırlanması..	26
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	27
4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky Diyotunun Farklı Voltajlarda Kapasite - Kondüktans - Frekans Karakteristikleri	27
4.2. Nicolian and Goetzberger Metodu ile Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotunun Seri Direnç Değerlerinin Hesaplanması	29
4.3. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotunun Farklı Voltajlarda C_c -f ve G_c -f Değişim Eğrileri.....	31
4.4. Organik Arayüzey Tabakası Kalınlık Hesaplanması	33
4.5. Kondüktans (G_p/w -log f) Yöntemi ile Arayüzey Durumlarının Hesaplanması	34
4.6. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotuna ait Empedans Ölçümleri.....	37

4.7. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotunun Dielektrik özelliklerinin incelenmesi.....	40
---	----

BÖLÜM 5. SONUÇLAR	42
-------------------------	----

KAYNAKLAR	44
-----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	49
----------------	----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A_{0X}	: Yalıtkan oksit tabakanın alanı
C	: Kapasitans
C_m	: Ölçülen Kapasitans
C_{OX}	: Oksidin kapasitansı
C_{SC}	: Uzay yükü kapasitansı
C_p	: Dökme Kapasitansı
d	: Organik arayüzey tabakası kalınlığını
d_{ox}	:Yalıtkan kalınlığı
D_{it}	:Arayüzey durum yoğunluğu
E_{ox}	:Yalıtkan dielektrik sabiti
E_c	: İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerji seviyesi
E_i	:Saf Fermi enerji seviyesi
E_v	:Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi
ϵ_0	:Boşluğun Dielektrik Sabiti
ϵ^*	: Karmaşık Dielektrik Geçirgenlik Sabiti
ϵ'	: Gerçek Dielektrik Sabiti
ϵ''	: Dielektrik Kayıp
G	:Kondüktans
G_c	:Gerçek Kondüktans
G_p	:Paralel Kondüktans
N_A	: Yarıiletkendeki alıcıların yoğunluğu
R_s	: Seri direnç
R_p	: Kütle Direnci
:	:

S	Diodya tutasal alanı
$\tan\delta$	: Dielektrik kayıp.....
V_G	:Gerilim
V_{OX}	: Oksit.ara yüzey. tabakası.üzerine düşen gerilim
Z^*	: Kompleks Empedans.....
Z'	: Kompleks empedansın gerçek.(reel) bileşeni
Z''	: Kompleks empedansın imajiner (tepkisel) bileşen
w	: Açık Frekans
q	: Elektron yükü
ϕ_b	: Metal ile yalıtkan (oksit).arasındaki potansiyel engeli
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	: Yarıiletkenin elektron yakınlığı
χ_i	: Yalıtkanın elektron yakınlığı
τ	: Taşıyıcı ömrü
Q_M	: Metal yüzeyindeki toplam yük
Q_S	: Yarıiletkendeki toplam yük
Q_{SC}	: Uzay yükü bölgesindeki biriken yük
ψ_B	: Fermi ile saf fermi enerji seviyesi arasındaki fark
ψ_S	: Ara yüzeyindeki bant gerilimi
BODIPY	: Bordipirometen
MS	:Metal/Yarıiletken
MIS	: Metal/Yalıtkan/Yarıiletken
MOS	: Metal/Organik/Yarıiletken
BODIPY	: Bordipirometen
MS	:Metal/Yarıiletken
MIS	: Metal/Yalıtkan/Yarıiletken
MOS	: Metal/Organik/Yarıiletken
OLED	: Organik ışık yayan diyot
SBD	: Schottky Engel Diyotları

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir MOS yapının şematik gösterimi.	5
Şekil 2.2. $V = 0$ 'da ideal bir MOS yapının enerji-band diyagramı a) p-tipi yarıiletken b) n-tipi yarıiletken.....	6
Şekil 2.3. Bir metal-oksit-yarıiletken yapının enerji band diyagramı.....	8
Şekil 2.4. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MOS) yapının eşdeğer devresi.....	9
Şekil 2.5. p-tipi ve n-tipi eklemlerin yığılım durumunda band diyagramları.	11
Şekil 2.6. p-tipi ve n-tipi eklemlerin tersinim durumunda band diyagramları.....	12
Şekil 2.7. p-tipi ve n-tipi eklemlerin tükenim durumunda band diyagramları.....	12
Şekil 2.8. İdeal olmayan (Gerçek) MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin temel sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.9. Arayüzey durumları	15
Şekil 2.10. Metal/yarıiletken kontaklarda seri direncin etkili olduğu bölge	16
Şekil 2.11. Bir seri direnç bir çift paralel direnç ve paralel kapasitanstan oluşan eşdeğer devre.....	20
Şekil 3.1. BOD-Z-EN bileşiğinin kimyasal sentezi	25
Şekil 3.2. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun şematik gösterimi	26
Şekil 4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotun 0.0 V-1.0 V aralığındaki kapasite-frekans grafiği.....	28
Şekil 4.2. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotun 0.0 V-1.0 V aralığındaki kondüktans-frekans grafiği	29
Şekil 4.3. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0 V-450 mV aralığındaki R_s -f grafiği	30
Şekil 4.4. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 500 mV-1 V aralığındaki R_s -f grafiği	30
Şekil 4.5. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V-1.0 V aralığındaki C_c -f grafiği	32

Şekil 4.6. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 50.0 mV-400.0 mV aralığındaki G_c -f grafiği	33
Şekil 4.7. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 450.0 mV-1.0 V aralığındaki G_c -f grafiği	33
Şekil 4.8. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V 600.0 mV aralığındaki G_p/w -log f grafiği	35
Şekil 4.9. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 mV -500 mV aralığındaki Z' -log f grafiği	38
Şekil 4.10. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 550 mV-1000 mV aralığındaki Z' - log f grafiği	38
Şekil 4.11. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 mV -500 mV aralığındaki Z'' - log f grafiği	39
Şekil 4.12. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 550.0 mV -1000 V aralığındaki Z'' - log f grafiği	39
Şekil 4.13. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V-1 V aralığındaki ϵ' -log f grafiği.....	40
Şekil 4.14. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V-1 V aralığındaki ϵ'' -log f grafiği.....	41
Şekil 4.15. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V-1 V aralığındaki $\tan\delta$ -log f grafiği.....	41

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. V , f_{pik} , G_p/w , D_{it} ve τ değerleri	36	..
---	----	----



BOD-Z-EN ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE KAPASİTE- İLETKENLİK- VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında BOD-Z-EN organik bileşiği uygun yöntemlerle sentezlenmiş ve BOD-Z-EN arayüzey tabakalı Au/BOD-Z-EN/n-Si/In schottky diyotu elde edilmiştir. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun frekansa bağlı kapasitans-frekans (C-f), kondüktans-frekans (G-f) ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümleri sonucunda; voltaj değeri arttıkça kapasite (C) ve kondüktans (G) değerinin de arttığı, artan frekans değeriyle birlikte ise kapasite değerinin azaldığı ve kondüktans değerinin arttığı belirlenmiştir. Frekans değerinin artmasıyla seri direnç (R_s) değerinin azaldığı hesaplanmış; düzeltilmiş kapasite ve kondüktans değerlerinin ise seri dirençten önemli ölçüde etkilendiği alınan ölçüm sonuçları karşılaştırılarak belirlenmiştir.

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun arayüzey durumlarının varlığı kapasitans spektroskopisi yöntemiyle belirlenmiştir. Empedans spektroskopisi yöntemiyle elde edilen sonuçlara göre ise frekans değeri arttıkça empedans değerlerinin azaldığı görülmüştür. Dielektrik hesaplamalarda elde edilen sonuçlarda frekans değerinin artmasıyla ϵ' ϵ'' ve $\tan \delta$ değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Tüm bu sonuçlar Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun bir MOS tipi kapasitör gibi davrandığını ve enerji depolayabilen bir aygıt olabileceğini göstermektedir. BOD-Z-EN gibi BODIPY tabanlı bileşiklerin elektronik ve optoelektronik gibi aygıt uygulamalarında arayüzey tabakası olarak kullanılabileceği bu tez çalışmasında gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dielektrik, Kapasite-frekans, Schottky, Seri Direnç,

PRODUCTION OF Au/BOD-Z-EN/n-Si/In SCHOTTKY DIODE AND INVESTIGATION OF CAPACITY-CONDUCTIVITY- VOLTAGE CHARACTERISTICS

SUMMARY

In this thesis study, the BOD-Z-EN organic compound was synthesized with appropriate methods and the BOD-Z-EN interface layer Au/BOD-Z-EN/n-Si/In schottky diode was obtained. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diode frequency-dependent capacitance-frequency (C-f), conductance-frequency (G-f) measurements were made. As a result of these measurements, capacity (C) and conductance(G) value increased as the voltage value increased, and with the increased frequency value, the capacity value decreased and the conductance value increased. It was calculated that the serial resistance (R_s) value decreased with the increase in frequency value; corrected capacity and conductance values were significantly affected by serial resistance.

The presence of interface states of Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diode is determined by capacitance spectroscopy. According to the results obtained by impedance spectroscopy method, it was observed that the impedance values decreased as the frequency value increased. In the results obtained in dielectric calculations, it was determined that the ϵ' ϵ' and δ values decreased with the increase in frequency value.

All these results indicate that the Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diode acts as an MOS capacitor and can be an energy-storing device. It is shown in this thesis study that BODIPY-based compounds such as BOD-Z-EN can be used as interface layers in device applications such as electronics and optoelectronics.

Keywords: Dielectric, Capacity-frequency, Schottky, Series resistance,

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Metal/yarıiletken (MS) kontaklar yarıiletken teknolojisi için gerekli en önemli cihazlardır [1, 2]. Bunlar Schottky engel diyotları (SBD) olarak bilinirler [3]. Metal/yarıiletken kontakların elektriksel özelliklerinden daha iyi faydalanabilmesi için elektriksel, termal ve optik karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [1-4]. Schottky tarafından metal/yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli olduğu fikri ortaya konulduğu için bu yapılar Schottky engel diyotları ismini almıştır [4, 5].

Metal/yarıiletken kontakların doğrultma davranışını anlamak için yapılan ilk çalışmalar Schottky ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [2]. Bu tür kontaklar, çeşitli optoelektronik ve elektronik cihaz teknolojilerinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Schottky diyotlar, teknolojik alanda, optoelektronikte, telekomünikasyon alanında, LED uygulamaları, güneş pilleri, kontrol sistemleri ve elektronik devre elemanları gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar [4, 5].

Schottky kontaklardan faydalanabilmek için elektriksel karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [6]. Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini daha iyi anlamak için uzun süredir çalışmalar yapılmaktadır [6]. Schottky kontakların arayüzey özellikleri ile elektriksel özellikleri belirlenmektedir. Metal ile yarıiletken bir araya geldiğinde bunların arasında bir oksit tabaka meydana gelir ve bu oksit tabaka metal/yarıiletken kontakları metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapısına dönüştürür. Bu yapıyla ilgili ilk başarılı çalışma Si altlık üzerine SiO_2 ince filmin büyütülmesiyle Ligenza ve Spitter tarafından yapılmıştır [7]. Metal/yarıiletken yapıların elektriksel karakteristikleri, metal ve yarıiletken arasındaki kullanılacak olan arayüzey malzemelerine bağlı olarak değişmektedir. Başka bir deyişle, kullanılan arayüzey malzemesi metal yarıiletken yapısının idealite faktörü, engel yüksekliği gibi çeşitli parametrelerini değiştireceği için cihazın verimini de

etkilemektedir [8, 9]. Uygun bir organik yarıiletkenin arayüzey malzemesi olarak kullanıldığı Schottky kontakların elektriksel parametrelerinin değiştirilebildiği uzun zamandır bilinmektedir.

Organik yarıiletken malzemeler, düşük maliyetli ve nispeten kolay üretilmelerinden dolayı metal yarıiletken kontaklar için arayüzey malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Bu kontaklar ve heteroeklemler farklı organik yarıiletken bileşikler kullanılarak üretilmekte ve karakteristikleri analiz edilmektedir [8, 10, 11].

Organik yarıiletken malzemeler, elektronik karakteristiklerinden dolayı çok fazla ilgi çekmektedirler. Bu sebeple organik yarıiletkenler elektronik ve optoelektronik alanda organik ışık yayan diyot (Organic Light Emitting Diode-OLED), organik alan etkili transistörler (Organic Field Effect Transistor-OFET), organik Schottky engel diyotları, fotovoltaiik ve güneş pilleri ve boyaya duyarlı güneş pilleri gibi uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır [12-14].

Geleceğin en umut verici organik yarıiletkenleri arasında gösterilen BODIPY (Bordipirometen) organik bileşiği, görünür bölgedeki emisyonları ve yüksek kuantum verimlerinden dolayı birçok uygulamada farklı amaçlar için kullanılmaktadır. BODIPY, akıllı devre anahtarları, ışık toplama sistemleri, boyar madde ile duyarlaştırılmış güneş pilleri, polimerler, lazer boyaları ve OLED uygulamalarındaki geniş uygulama yelpazesinden dolayı son yıllarda büyük ilgi görmektedir [15-18].

Kapasitans karakteristikleri fiziksel ve yapısal parametrelerin belirlenmesini sağlar. Ayrıca ölçülen kapasitans değerleri arayüzey durumlarının varlığına ve yük dağılımının belirlenmesine izin verir [19]. Yapıya voltaj uygulandığında ara yüzeyde bulunan taşıyıcının salınmasına ve yakalanmasına yol açabilir. Schottky engel diyotların kapsidansı üzerine literatürde oldukça fazla çalışma vardır. Ho ve meslektaşları Schottky kontakların doğru ön gerilim kapasitans voltaj eğrilerinde (C-V) olağan dışı bir pik gözlemlenmiştir ve bu pikin nedenini ara yüzey durumlarına bağlamışlardır [20]. Werner ve arkadaşları omik olan ve omik olmayan kontakların

C-V eğrisinde maksimum bir kapasitans sergilediği omik kontaklarda herhangi bir pik gözlemlenmediği görülmüştür [21]. Omik olmayan arka kontakta büyük bir seri dirençle sonuçlanacağı için seri direnç ile C-V eğrisi arasında bir bağ kurulabilir. Kapasitansın maksimum olması ve durumu ara yüzey durumlarına, kalınlığına ve katkılama konsantrasyonuna bağlıdır.

Bu çalışmada BOD-Z-EN organik bileşiğinin arayüzey tabakası olarak kullanıldığı Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky tipi diyotun üretimi, kapasiteye bağlı voltaj ve frekans ölçümlerinin yapılması ve bu ölçümlerden yararlanarak kapasitans, kondüktans, seri direnç, arayüzey durumları ve dielektrik özellikleri gibi parametrelerin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu tez çalışması, dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde bu çalışmanın içeriği ve amacı hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölüm metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar hakkında teorik bilgileri içermektedir. Üçüncü bölümde organik bileşiğin sentezi, diyot üretimi ve ölçüm sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde kapasiteye bağlı voltaj ve frekans ölçümleri ile elde edilen grafikleri ve hesaplanan diyot parametrelerini içermektedir. Beşinci bölümde ise elde edilen veriler tartışılmış ve tez çalışması boyunca elde edilen sonuçlar kısaca özetlenmiştir.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

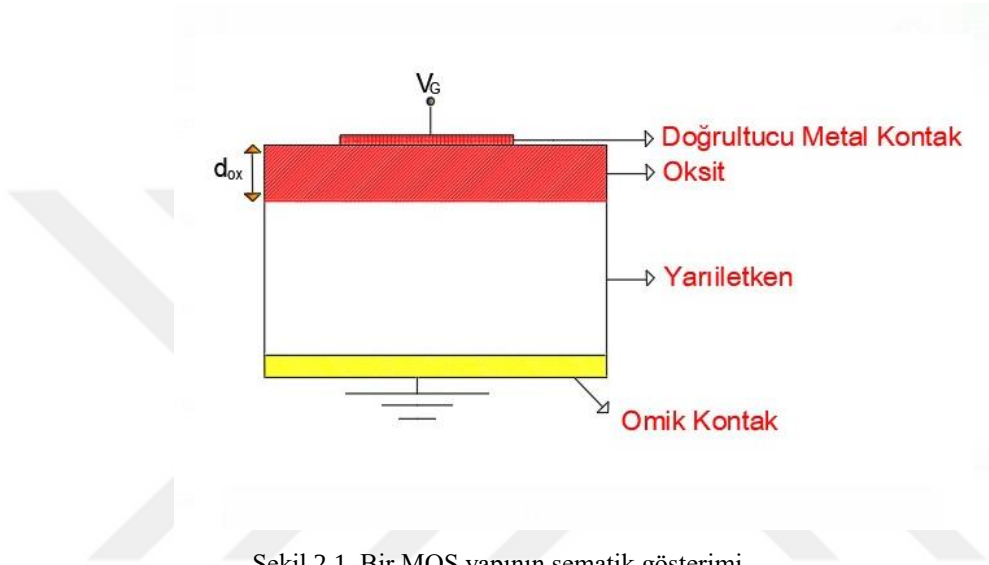
2.1 Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) Yapı

Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapısı hakkında literatürde ilk öneriler 1959 yılında Moll tarafından yapılmıştır [22]. Önerilen bu yapı termal olarak oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali üzerinde bir alüminyum metal elektrottan oluşmaktaydı. Daha sonra, MOS kapasitörün oksit-silisyum arayüzeyinde bağ durumlarının özellikleri Terman tarafından ortaya konmuştur [23]. Terman, metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitöre d.c. gerilim uygulayarak kapasitansın frekansa bağıllığını ölçmüştür. Ölçülen kapasitans-voltaj ile teorik kapasitans-voltaj verilerini karşılaştıran Terman, termal olarak oksitlenmiş silisyum arayüzey tuzaklarının zaman sabitlerini elde etmiştir.

Metal ile yarıiletken tabakaları birbirinden ayırmak için kullanılan ve kalınlığı 100 Å 'dan büyük olan oksit tabakanın (SiO_2 , SnO_2 , TiO_2 , Si_3N_4 vb.) yalıtkanlık özeliğinden dolayı MOS yapılar paralel plakalı kondansatörlere benzeyen yapılardır. Yapay olarak oluşturulan oksit tabakası metal ile yarıiletken arasında oluşacak bir sızıntı akımını önlemeye çalışır.

Şekil 2.1'de MOS yapının şematik gösterimi verilmiştir. MOS yapılar yalıtkan oksit tabakasının dielektrik özelliğinden dolayı paralel levhalı bir kondansatöre benzemektedir. Levhalardan birisi omik kontağı oluşturmaktadır diğeri doğrultucu metal kontak olarak görev yapmaktadır. Bu şekilde; d_{ox} yalıtkan kalınlığı, E_{ox} yalıtkan dielektrik sabiti ve V_G ise gerilimi temsil etmektedir.

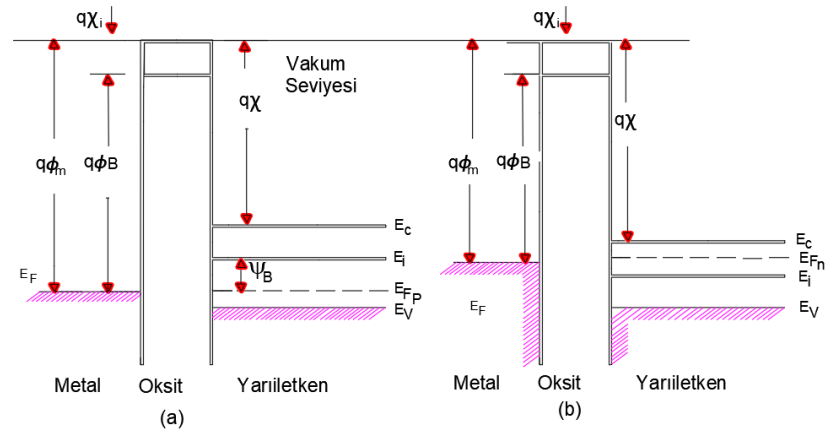
MOS yapılarının özellikleri oksit yarıiletken ara yüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bu sebeple oksit tabaka çok kaliteli olmalı ve yarı iletken ara yüzeyindeki doymamış bağların en az düzeyde olması istenmektedir. Oksit tabakanın kalitesiz olması ve doymamış bağların fazla olması MOS yapının özelliklerini değiştirmekte ve böylece MOS yapının ideal özellik göstermemesine neden olmaktadır [24, 25].



Şekil 2.1. Bir MOS yapının şematik gösterimi.

2.1.1. İdeal MOS Yapı

İdeal bir MOS yapısının (p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler için) enerji uygulanmadığı durumda enerji-bant diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. $V = 0$ 'da ideal bir MOS yapının enerji-band diyagramı a) p-tipi yarıiletken b) n-tipi yarıiletken.

Şekilde verilen tüm fiziksel parametrelerin açık ifadesi aşağıdaki gibidir:

ϕ_m : Metalin iş fonksiyonu

ϕ_s : Yarıiletkenin iş fonksiyonu

ϕ_b : Metal ile yalıtkan (oksit) arasındaki potansiyel engeli

χ : Yarıiletkenin elektron yakınlığı

χ_i : Yalıtkanın elektron yakınlığı

E_v : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

E_c : İletkenlik bandı enerji seviyesi

E_i : Saf Fermi enerji seviyesi $(E_c - E_v)/2$

E_F : Fermi enerji seviyesi

ψ_B : Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark

İletkenlerde fermi enerjisi; mutlak sıfır sıcaklık değerinde ($T = 0$ K) elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisine denir. Yarıiletkenlerde fermi enerjisi ise iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviye olarak tanımlanmaktadır. Vakum seviyesi; bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjiye

sahip bir elektronun enerji seviyesidir. Metalin iş fonksiyonu (ϕ_m), bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak veya serbest hale getirmek için gerekli olan minimum enerji miktarıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu (ϕ_s) ise; yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Bu enerji seviyesi yarıiletkene katkılanan katkı atomlarının yoğunluğuna ve sıcaklığına göre değişen bir niceliktir. Elektron yatkınlığı ise (χ); vakum seviyesi ile yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkıdır.

Aşağıdaki özellikleri taşıyan MOS yapısı ideal MOS yapısı olarak ifade edilebilir [24, 25].

1) Sıfır beslem durumunda metalin iş fonksiyonu (ϕ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (ϕ_s) arasındaki enerji farkı sıfırdır ve p ve n tipi yarıiletkenler için aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad \text{n tipi yarıiletken için} \quad (2.1)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad \text{p tipi yarıiletken için} \quad (2.2)$$

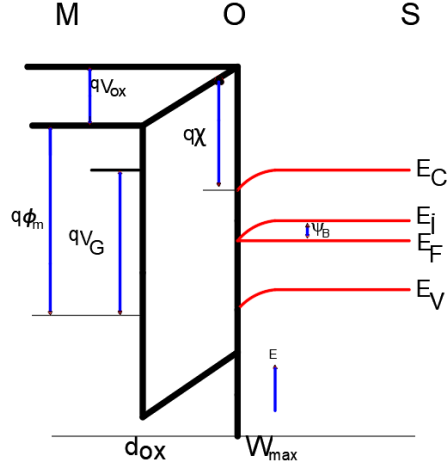
Burada E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığı E_f fermi enerji seviyesi, E_f ile saf fermi enerji seviyesi arasındaki enerji farkıdır.

2) Yarıiletken ve metal tabakalar arasındaki yalıtkan, bant aralığı çok büyük olduğundan ideal bir dielektriktir. Yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken ara yüzeyinde tuzaklar sabit ve hareketli iyonlar ve ara yüzey yükleri de bulunmaz.

3) Oksidin bant aralığı o kadar büyüktür ki oksidin iletim bandında termik yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilecek kadar küçüktür.

4) DC gerilim altında yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur. Yani oksidin özdirenci sonsuzdur.

5) Herhangi bir beslem altında yalıtkan tabaka ile bitişik olan metal yüzeydeki yükler ile yarıiletkendeki yükler eşit ve zıt yönlüdür.



Şekil 2.3. Bir metal-oksit-yarıiletken yapının enerji band diyagramı

İdeal MOS yapısındaki bir metal elektroda gerilim uygulandığında yarıiletkende yük kaymaları meydana gelir. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metalinkine göre daha az uygulanan gerilime bağlıdır. Yarıiletken ara yüzey bölgesinde uzay yükleri (Q_{sc}) vardır. Bunlar da bantların bükülmesine bağlıdır.

Yarıiletkende katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcıları vardır. Yarıiletkende serbest olmayan yükler olduğundan gerilim uygulandığında yük ya uzay yük bölgesinde ya da ara yüzey bölgesinde yığılmalara neden olur. Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan tabaka üzerine düşer. Buna göre MOS yapısına uygulanan gerilim aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V_G = V_{OX} + \psi_s \quad (2.3)$$

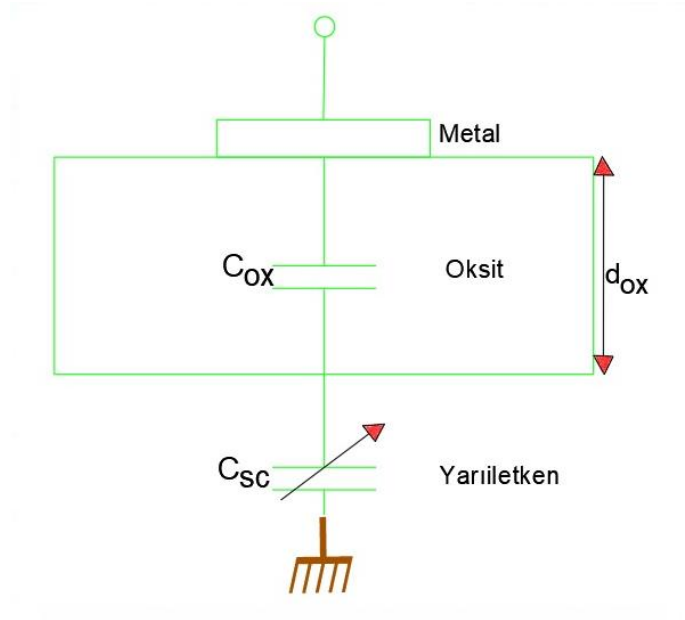
Burada V_{OX} oksit ara yüzey tabakası üzerine düşen gerilim, ψ_s ise ara yüzeyindeki bant gerilimidir. Bu durumda sistem üzerindeki toplam yük kondansatördeki yüklere benzetilerek aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q_M = Q_N + qN_A w = Q_S \text{ veya } Q_M + Q_{SC} = 0 \quad (2.4)$$

Burada Q_M tersinim bölgesindeki birim alan başına düşen elektronların oluşturduğu toplam yük miktarını, $qN_A w$ ise genişliğindeki uzay yükü ile uzay yükü bölgesindeki birim alan başına iyonize olmuş alıcı katkı atomların sayısıdır. N_A yarıiletkendeki alıcıların yoğunluğudur. Q_S yarıiletkendeki toplam yük, Q_M metal yüzeyindeki toplam yük, Q_{SC} ise uzay yükü bölgesindeki biriken yüküdür.

2.1.1.1. MOS Kapasitansı

Metal ve yarıiletken tabaka arasında bulunan yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Buna MOS kapasitansı denir. Bu kapasitansın özelliklerini metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki oksit ve oksit-yarıiletken ara yüzeyi belirler [24, 25]. Kapasitans ara yüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MOS yapısının eşdeğer devresi Şekil 2,4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MOS) yapının eşdeğer devresi.

Bu şekilde C_{OX} oksidin kapasitansı, C_{SC} ise uzay yükü kapasitansını temsil etmektedir. Bunların eşdeğer kapasitansları bize MOS yapının kapasitansını verecektir. MOS kapasitansı ise şu şekilde ifade edilir.

$$C_{ox} = \frac{dQ_M}{dV_{ox}} A_{0X} \quad (2.5)$$

$$C_{SC} = \frac{dQ_{SC}}{dV_S} A_{0X} \quad (2.6)$$

$$C = \frac{dQ_M}{dV_G} A_{0X} \quad (2.7)$$

Burada, A_{0X} yalıtkan oksit tabakanın alanı, C ise MOS toplam kapasitansıdır. MOS kapasitansı aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{SC}} + \frac{1}{C_{OX}} \quad (2.8)$$

Yalıtkan oksit kapasitansı C_{OX} ise şu şekilde de ifade edilebilir,

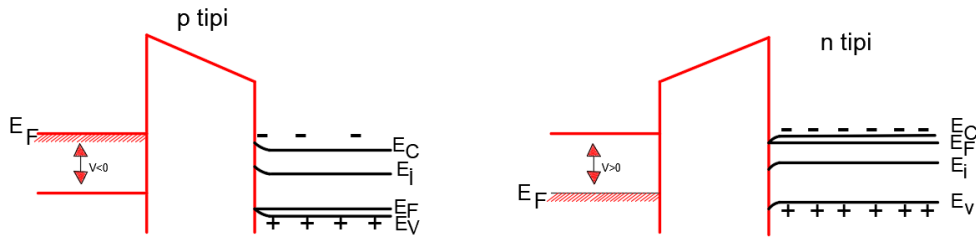
$$C_{OX} = \frac{\epsilon_{OX}}{d_{ox}} A_{OX} \quad (2.9)$$

Burada ϵ_{OX} oksit tabakanın dielektrik sabiti, d_{OX} ise tabakanın kalınlığıdır. C_{OX} uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MOS yapının kapasitansındaki değişimi sadece Q_{SC} uzay yük kapasitansı belirler.

MOS yapılarında uygulanan gerilimle birlikte yığılım, tersinim ve tükenim bölgeleri olarak adlandırılan 3 bölge oluşmaktadır. Bu bölgeler aşağıda açıklanmıştır.

2.1.1.2. Yığılım Bölgesi

Metal plakaya negatif gerilim uygulandığında p tipi yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan holleri yarıiletken ara yüzeyine doğru çekecektir. Değerlik bandının yarıiletken ara yüzeyinde iletim bandı fermi seviyesine yaklaşır ve buna bağlı olarak iletim bandı yukarı doğru bükülür (Şekil 2.5.). Bu duruma yığılım adı verilir [24, 25]. Bu sebeple ara yüzeyde yüzey yükü birikir. Böylece $C_{SC} \rightarrow \infty$ ve bu sebepten $C \rightarrow C_{OX}$ olur.

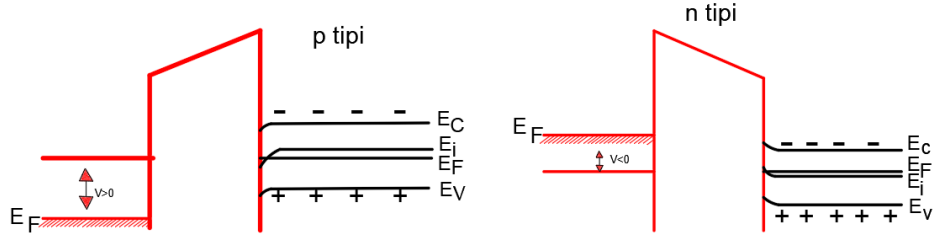


Şekil 2.5. p-tipi ve n-tipi eklemlerin yığılım durumunda band diyagramları.

2.1.1.3. Tersinim Bölgesi

MOS yapısının metal elektrotuna daha büyük pozitif bir gerilim uygulandığı durumda bantların aşağı doğru büküldüğü bilinmektedir. Bu durumda, saf durumdaki enerji seviyesi, Fermi enerji seviyesinin altına geçer ve yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar (p tipi yarıiletken için elektronlar) artmaya başlar. Azınlık taşıyıcılarındaki bu artış ile elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan daha fazla olur ve bu nedenle p-tipi bir yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranmaya başlar. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır [24, 25]. Şekil 2.6'da p-tipi ve n-tipi eklemlerin tersinim durumunda band diyagramları gösterilmiştir. Bu durumda

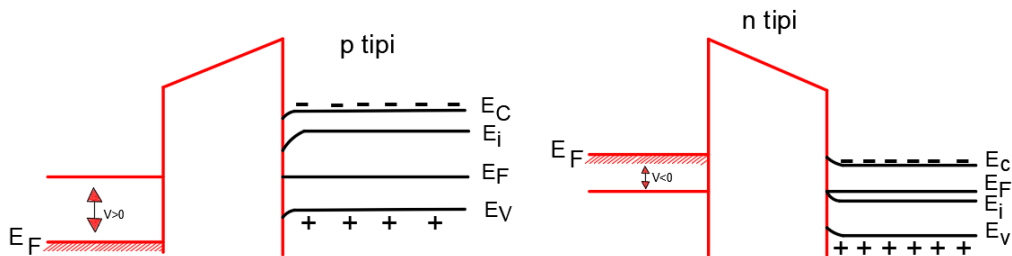
elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin AC sinyalini takip edebilme yeteneği MIS kapasitesini belirler.



Şekil 2.6. p-tipi ve n-tipi eklemlerin tersinim durumunda band diyagramları

2.1.1.4. Tükenim Bölgesi

Metal plakaya küçük bir pozitif gerilim uygulandığında oksit içindeki elektrik alan yarıiletken yüzeyindeki holleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletkendeki hol yoğunluğu yarıiletkenin iç kısımlarındaki hol yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağıya doğru bükülür (Şekil 2.7.). İletim bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen genişliğinde bir bölgede hollerin azaldığı bir tükenim bölgesi meydana gelir. Bu bölgeye tükenim bölgesi, bu olaya da tükenim olayı denir [24, 25].

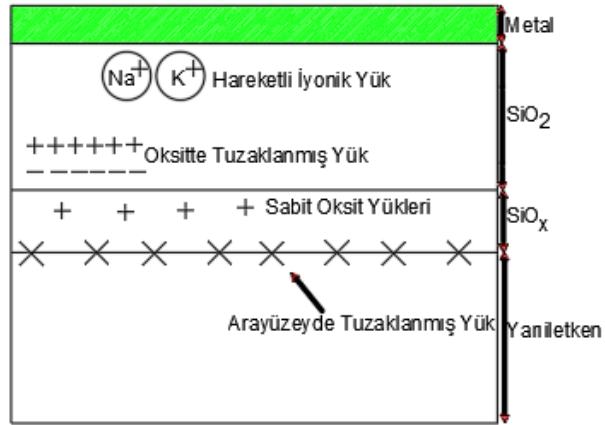


Şekil 2.7. p-tipi ve n-tipi eklemlerin tükenim durumunda band diyagramları

2.1.2. Gerçek MOS Yapısı

İdeal bir MOS yapısında; yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde hiçbir sabit ve hareketli yük bulunmamaktadır. Gerçek durumda ise oksit-yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak yüksüz değildir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan oksit-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yonteme bağlı olarak ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması MOS yapısının özelliklerini değiştirerek ideal özelliklerinden sapmasına neden olmaktadır. Gerçek bir MOS yapısında birçok durumlar ve yükler mevcuttur. Genel olarak bir yalıtkan/yarıiletken sisteminde dört tip yük bulunmaktadır (Şekil 2.8). Bu yükler sırasıyla aşağıdaki gibi sıralanabilir;

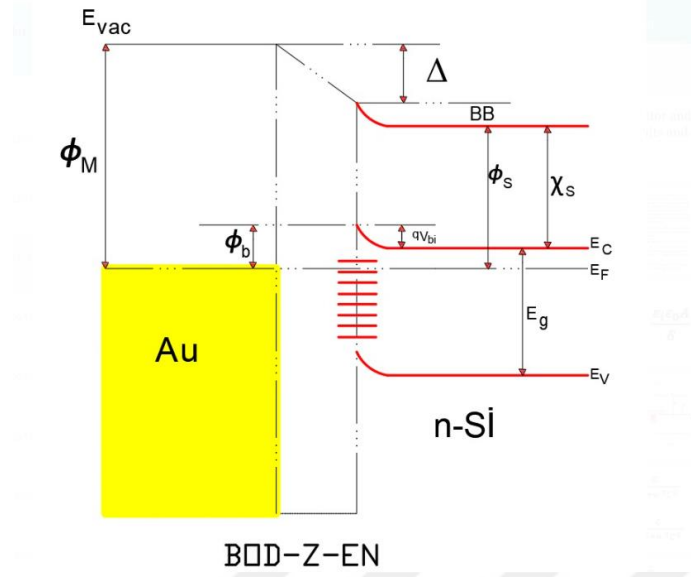
- 1) Beslem altında oksit içinde hareketli iyonlardan oluşan hareketli oksit yükü,
- 2) Oksit içindeki safsızlıklar ve kırık bağlar gibi kusurlardan veya numunenin radyasyona maruz kalmasıyla oluşabilen oksitte tuzaklanmış yükler,
- 3) Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alanı altında hareketsiz olan sabit oksit ve arayüzey yükleri,
- 4) Oksit-yarıiletken arayüzeyinde yasaklanmış bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları.



Şekil 2.8. İdeal olmayan (Gerçek) MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin temel sınıflandırılması

2.1.2.1. Arayüzey Durumları

Arayüzey durumları yarıiletkenle yükleri değişebilen arayüzeydeki yasak bant aralığı içinde girilebilir enerji seviyeleridir (Şekil 2.9.). Arayüzey durumları alıcı veya verici şeklinde olabilir. Alıcı, enerji seviyeleri dolu ise negatif, boş ise yüksüzdür. Verici, enerji seviyeleri dolu ise yüksüz, boş ise pozitifdir. Bir gerilim uygulandığı zaman, arayüzey tuzak seviyeleri valans ve iletkenlik bantları ile aşağı yukarı hareket ederlerken Fermi seviyesi gerisinde sabit kalır. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzakları iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla oluşur. Arayüzey tuzaklarındaki yük değişimi MIS ve MOS kapasitansına katkıda bulunduğundan ideal MOS eğrisinin de değişeceği bilinmektedir [26].



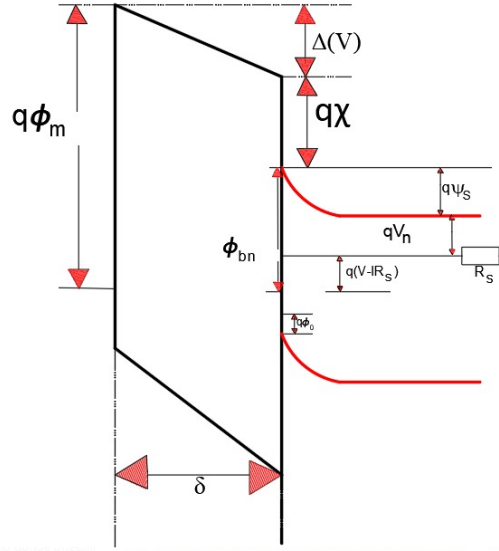
Şekil 2.9. Arayüzey durumları

2.1.2.2. Seri Direnç

MOS yapılarının elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde ideal MOS yapısından sapıldığı durumlarla karşılaşmaktadır. Bu sapmaların en önemli nedenlerinden bir tanesi de seri direnç etkisidir [27]. Bir diyotta seri direnç (R_s) metal kontakların ve kullanılan yarıiletkenin hacminin direnci olarak tanımlanmaktadır. Seri dirence metal kontakların ve yarıiletken direnci neden olur. Seri dirence neden olan başlıca etkenler şu şekilde sıralanabilir;

- Yarıiletkenin gövdesinden gelen katkı,
- Doğrultucu kontak üzerinde ölçüm için kullanılan tel,
- Kristalin arka yüzeyine yapılan omik kontak,
- Kristal ile omik kontak arasında bulunan gövde direnci,
- Arayüzeyde oluşan oksit tabaka ve yüzey kirliliği,
- Kristalin doğrultucu kontakta bulunan tüketme tabakası.

Şekil 2.10'da seri direncin, metal/yarıiletken kontaklardaki eğrisi grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2.10 incelendiğinde seri direncin yüksek voltajlarda etkili olduğu ve diyotun ideal davranışından sapmaya neden olduğu görülmektedir.



Şekil 2.10. Metal/yarıiletken kontaklarda seri direncin etkili olduğu bölge

Metal-yarıiletken, MIS ve MOS yapılar da seri direnci hesaplamak için çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Bu metotlardan bazıları;

- 1) Nicolian and Goetzberger [28],
- 2) Norde [27],
- 3) Cheung & Cheung şeklinde sıralanabilir [29].

Bu tez çalışmasında seri direnci hesaplamak için Nicollian ve Goetzberger yöntemi kullanılmıştır [28]. Bu yönteme göre seri direnç C-V ölçümlerinden hesaplanabilmektedir. Nicollian ve Goetzberger metoduna göre seri direnç, kuvvetli yığılma bölgesinde elde edilen kapasite ve kondüktans değerlerinden yararlanarak şu şekilde ifade edilir;

$$R_s = \frac{G}{G^2 + (\omega C)^2} \quad (2.10)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada $\omega = 2\pi f$ olarak alınırken, C ve G ise sırasıyla kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasite ve kondüktans değerleridir.

2.2. Dielektrikler

Yüksek dirençli sahip ve 4eV'dan büyük yasak enerji aralığına sahip (yalıtkan) malzemeler dielektrik malzeme olarak tanımlanmaktadır. Dielektrik malzeme, dış bir elektrik alan içine konulduğunda elektrik yükleri iletken malzemede olduğu gibi malzeme boyunca ilerlemez, ancak elektrik alan yönünde konumlanarak dielektrik polarizasyona neden olurlar. Dielektrik malzemeler, bir elektrik alanın etkisi altında polarize edilebilir malzemelerdir. Dielektrik polarizasyon nedeniyle pozitif yükler alan yönünde konumlanırken negatif yükler zıt yönde yer değiştirir ve dolayısıyla elektriksel yük merkezleri kayar. Bu durum dielektriğin içinde bir uçtan diğer uca uzanan bir iç elektrik alan oluşturur. Bir malzemenin polarize edilebilirliği, o malzemenin geçirgenliği olarak ifade edilir. Geçirgenlik, aynı zamanda dielektrik sabiti olarak da adlandırılır. Mükemmel bir dielektrik sıfır elektrik iletkenliğine sahip bir malzeme olsa da tüm yalıtkanlar dielektrik değildir.

Dielektrikler, entegre devre teknolojisinde çeşitli bileşenleri elektriksel olarak izole etmek için de kullanılır [30, 31]. Uygulanan AC elektrik alanının sıklığı, dielektrik özelliklerin yanı sıra elektriksel özellikler üzerinde de önemli etkilere sahiptir. Bu, zamanın değişiminin ($T = 1/2\pi f$) ve D_{it} 'deki dolum gevşeme / yaşam süresinin sonuçlarıdır. Dielektrik izin, belirli bir elektrik alanında meydana gelen polarizasyon derecesidir. Bir elektrik alanı dielektrik malzemeler üzerinde polarizasyon yaratabilir.

2.2.1. Dielektrik Özellikler

Malzemelerin dielektrik özelliklerinin güçlü frekansa bağımlılığı bilinmektedir. Bir malzemenin dielektrik davranışının sıcaklık ve frekansa bağımlılığı genellikle o malzemenin kimyasal, kristal ve faz yapısı ile ilgilidir. Dielektrik fonksiyonu (ϵ'), bir elektrik alan uygulandığında elektrik dipollerin oluşumuna karşı malzemenin ne kadar polarize olduğunu gösterir. Elektrik alan pozitif ve negatif arasında salınırken ϵ' , faz içinde veya dışındaki salınan alandaki indüklenmiş dipollere bağlı olarak negatif ya da pozitif değerler alabilir [30, 31]. Materyal içindeki indüklenmiş dipol salınımları çok büyük olduğunda malzeme elektrik alandan enerji soğurabilir. Soğurma gerçekleştiğinde ϵ'' önem kazanır. Malzeme saydam ise ϵ'' değeri sıfırdır, fakat soğurma başladığında sıfırdan farklı değerler alır. Yani ϵ'' malzeme içindeki soğurmayı temsil eder.

ϵ' ve ϵ'' birlikte yazıldığında kompleks dielektrik fonksiyonunu verir. Bunlar kompleks olarak adlandırılır çünkü iki kısım birlikte düşünülür.

Karmaşık dielektrik geçirgenlik sabiti (ϵ^*) denklem 2.11 gibi tanımlanmaktadır;

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.11)$$

Burada ϵ' , ϵ'' karmaşık dielektrik sabitinin gerçek ve hayali (sanal) kısmını ifade etmektedir ve ayrıca sırasıyla dielektrik sabit ve dielektrik kaybı temsil etmektedir. Buna ek olarak, j ($j = \sqrt{-1}$) hayali bir birimdir. Gerçek dielektrik sabiti, elektrik yük enerjisinin depolama kapasitesinin bir ölçüsüdür. Bu nedenle, dielektrik sabitinin büyüklüğü, denklem 2.12 kullanılarak ölçülen kapasitans (C_m) değerleri kullanılarak belirlenebilir.

$$\epsilon' = \frac{C_m}{C_0} = \frac{C_m d}{\epsilon_0 A} \quad (2.12)$$

Bu denklemde, C_0 boş kapasitörün kapasitansı, A üretilen diyotun alanı, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ($= 8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$) ve d ise arayüzey tabakasının kalınlığıdır. Dielektrik kayıp, AC elektrik alanının altında ısı olarak kaybedilen enerji büyüklüğüne bağlıdır. Bir malzemenin iyi bir dielektrik malzeme olarak nitelendirilebilmesi için düşük dielektrik kaybına sahip olması gerekmektedir. Dielektrik kaybın büyüklüğü, denklem 2.13'te görülen (G_m) ile belirlenebilir.

$$\epsilon'' = \frac{G_m}{\omega C_0} \quad (2.13)$$

Dielektrik kayıp teğet ($\tan\delta$) açısından da ölçülebilir. $\tan\delta$ ayrıca dielektrik dağılım faktörü olarak da adlandırılır ve aşağıdaki gibi verilir:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.14)$$

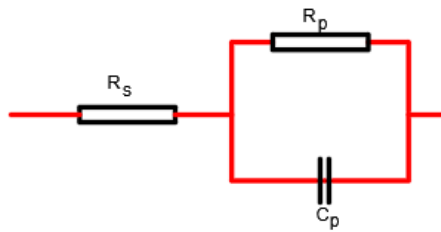
δ terimi, numune üzerindeki AC uyarıcı gerilim etkisiyle, bir dielektrik maddenin periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yerdeğiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. $\tan\delta$ ise, sığasal olarak numunede depolanan enerjinin bir periyot kayıp miktarı biçiminde dielektrik tanjant yada kayıp açısı olarak ifade edilir. Ölçüm esnasında, akımın dirençsel bileşeninin sığasal bileşene oranı olarak elde edilir.

2.3. Empedans spektroskopisi

Elektriksel empedans, genellikle basitçe empedans olarak adlandırılır, elektriğin alternatif bir akım (AC) devresinden ne kadar kolay aktığını tanımlamak için

kullanılan bir ölçümdür. Bir devrenin akıma sunduğu toplam karşıtlık miktarını tanımlanır.

Empedans spektroskopisi, geniş bir frekans aralığında bir malzemenin küçük genlikli sinyallere karşı verdiği tepkinin bir ölçüsüdür. Empedans spektroskopisi, yarı iletkenlerin elektrik ve dielektrik özellikler yani dielektrik karakterizasyonunda kullanılan yararlı bir tekniktir ve polimer, oksit, cam ve seramik gibi malzemelerin elektrik ve dielektrik karakterizasyonunda kullanılır [32, 33]. Bu yöntemle, özellikle empedans, admitans, ve dielektrik geçirgenlik (ϵ) gibi empedans ilişkili fonksiyonlar analiz edilebilir. Ayrıca, alternatif akım (AC) frekansına bağımlı bir cihazın empedansını ölçmek ve taşıma mekanizmasını belirlemek için de kullanılır. Yarı iletken cihazların eşdeğer devreleri empedans spektroskopisi yardımıyla elde edilebilir. Bu nedenle, MIS kondansatör, tek bir paralel direnç R_p ve seri direnç R_s ile kondansatör C_p ağı olarak tasarlanmış eşdeğer bir devre tarafından modellenmiştir. Empedans spektroskopisini tanımlayan eşdeğer devre Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Önerilen eşdeğer devre modelinde, R_p , C_p ve R_s sırasıyla kütle direncini, dökme kapasitansı ve temas direncini temsil eder. Eşdeğer devrenin parametreleri, ölçülen empedans verilerine sığdırarak hesaplanır.



Şekil 2.11. Bir seri direnç bir çift paralel direnç ve paralel kapasitanstan oluşan eşdeğer devre

Paralel RC devresi ile temsil edilen bir yarı iletken cihazın empedansı (Z) aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G + iwC} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right) + iwC} \quad (2.15)$$

Burada Y , G , C , R ve $w = 2\pi f$ giriş, kapasitans, kondüktans, seri direnç ve açısal frekanstır.

$$Z' = \frac{G}{G^2 + w^2 C^2} \quad (2.16)$$

$$Z'' = \frac{C}{G^2 + w^2 C^2} \quad (2.17)$$

Şekil 2.11’de gösterilen eşdeğer devrenin empedansı, kapasitans ve direnç katkılarının toplamına eşittir ve şu şekilde ifade edilir;

$$Z(w) = R_S + \frac{R_P}{1 + iwR_P C_P} = \left[R_S + \frac{R_P}{1 + (wR_P C_P)^2} \right] - i \left[\frac{wR_P^2 C_P}{1 + (wR_P C_P)^2} \right] \quad (2.18)$$

Kompleks empedans (Z^*) ise aşağıdaki denklem ile verilmektedir,

$$Z^*(w) = Z' - iZ'' \quad (2.19)$$

Bir malzemenin empedansının iki bileşenli bir ifadesi olan denklem 2.19’da Z' kompleks empedansın gerçek (reel) bileşeni ve Z'' ise kompleks empedansın imajiner (tepkisel) bileşenidir.

2.4. Kapasitans Spektroskopisi

Kapasitans spektroskopisi yöntemi daha düşük frekanslarda arayüzey kapasitans değerlerini elde etmek için kullanılabilir [34, 35]. Bir MOS yapının kapasitansı, düşük ve yüksek frekanslar için sırasıyla

$$C = C_{SC} + C_{it} \quad (2.20)$$

$$C = C_{SC} \quad (2.21)$$

olarak ifade edilir. Burada C_{SC} ve C_{it} sırasıyla alan yükü ve arayüzey kapasitansıdır.

Bir MOS kapasitörün arayüzey durum yoğunluğu (D_{it}) kapasitans metodu kullanılarak hesaplanabilir. Bu yöntemde paralel kondüktans olarak tanımlanan (G_p/w) frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülmektedir ve şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\frac{G_p}{w} = \frac{wC_{ox}^2 G_m}{G_m^2 + w^2(C_{ox} - C_m)^2} \quad (2.22)$$

Bir MOS yapının iletkenliği ve arayüzey durum yoğunluğu sırasıyla aşağıda sırasıyla denklem 2.23 ve 2.24'de verilmiştir.

$$C_{it} = SqD_{it} = \frac{\text{Arctan}(w\tau)}{(w\tau)} \quad (2.23)$$

$$D_{it} = \frac{(G_p/w)}{0.4qS} \quad (2.24)$$

Bu denklemlerde D_{it} arayüz durum yoğunluğu, S diyot temas alanı ve q elektron yükünü ifade etmektedir. τ ise taşıyıcı ömrü olarak tanımlanır ve;

$$\tau = \frac{1.98}{w} \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada w açısal frekansı temsil etmektedir ve $w=2\pi f$ ile gösterilir.

MOS yapısına ait paralel kondüktans başka bir deyişle (G_p/w)'nin farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişim eğrilerinde G_p/w için bir pik görülmesi durumunda yukarıda açıklanan denklemler yardımıyla arayüzey durum yoğunlukları hesaplanabilmektedir.

2.5. BODIPY Temelli Bileşiklerin Özellikler ve Kullanım Alanları

Dipirometen ligandlarının bor atomu ile yaptığı bileşikler “bordiropirometen” veya kısaca BODIPY olarak adlandırılır. BODIPY bileşiğinin sentezine ilişkin ilk çalışma 1968 yılında Treibs, A. ve Kreuzer, F.H tarafından yapılmıştır [36].

BODIPY bileşikleri ışık ve kimyasallara dayalı floresans maddelerdir. Görünür bölgedeki emisyonları ve yüksek kuantum verimleri nedeniyle ayı BODIPY bileşikleri boyar maddeler arasında yer almaktadır [37]. Buna ilave olarak, pirol halkasında süstitüe gruplar içerdiğinde kuantum verimleri daha da artmaktadır.

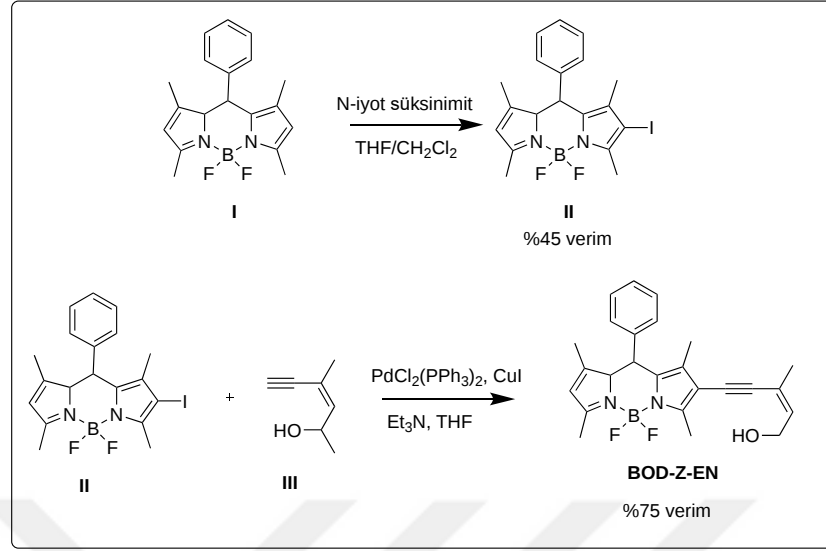
BODIPY çekirdeğinin soğurma ve floresans özellikleri çözücü ve pH'a bağlı olarak soğurma ve ciddi değişiklikler göstermemektedir. Ancak BODIPY çekirdeğine bağlanan süstitüe gruplar ile bu çekirdek arasında elektron aktarımı veya konjugasyonu olması durumunda, bu grubun fotofiziksel özelliklerinin değiştiği bilinir [37]. BODIPY çekirdeğine donör/akseptör özelliği bulunan fonksiyonel gruplar bağlanarak, asit-baz ve anyon/kasyon indikatörleri olarak kullanılmak üzere birçok BODIPY bileşiği sentezlenmiştir. BODIPY bileşikleri akıllı devre anahtarları, ışık toplama sistemleri, enerji transfer kasetleri, boyar madde ile duyarlaştırılmış güneş pilleri, Schottky diyotları, lazer boyaı ve OLED uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [37-39].

BÖLÜM 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında çapı 1” olan, 500 µm kalınlıkta, (100) yönelimli ve 20 Ω-cm öz dirence sahip, fosfor (P) katkılı n tipi bir silisyum kristali, yarıiletken bir alt tabaka olarak kullanılmıştır. Silisyum kristali üzerinde oluşabilecek olan oksitlenmeden dolayı silisyum kristali temizlenmiştir. Silisyum kristalinin temizlenme işlemi bittikten sonra diyotun yapım aşamasına geçilmiştir. Diyot hazır hale getirildikten sonra diyotun elektriksel karakteristiklerinin belirlenmesi ve diyota ait belirli parametrelerin hesaplanması için kapasite - frekans ölçümleri yapılmıştır.

3.1.1. Organik Yarıiletken Malzemenin Hazırlanması Sentezi

Şekil 3.1’de açık molekül yapısı gözüken ‘‘4,4-difloro-8-fenil-1,3,5,7-tetrametil-6-[(Z)-3-(5-hidroksi-3-etilpent-3-en-1-yn-1-yl)]-4-bor-3a,4a-diaza-s-indesen’’ bileşiğinin ismi (kapalı formülü $C_{25}H_{25}BF_2N_2O$) bu tez çalışmasında BOD-Z-EN olarak kısaltılmıştır. BOD-Z-EN maddesinin sentezi literatürde yer alan metota göre yapılmıştır.(Şekil 3.1) [40, 41]. Sentez sırasında kullanılan bütün kimyasallar ticari tedarikçilerden satın alınmış ve herhangi bir saflaştırma işlemi uygulanmadan kullanılmıştır. İlk olarak $PdCl_2(PPh_3)_2$ (7,02 mg) ve CuI (3,8 mg) içeren THF (10 ml) çözeltisi hazırlandı. Daha sonra bileşik **II** (45 mg, 0,1 mmol) ve **III** (19 mg, 0,02 mmol) karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımı ilk hazırlanan THF çözeltisine yavaş yavaş eklenmiştir. Daha sonra 3,9 mL Et_3N eklenmiştir. Reaksiyon karışımı gece boyunca 50 °C’de karıştırılmıştır. Reaksiyonun tamamlanmasından sonra, çözücü, vakum altında uzaklaştırılmış ve kalıntı, diklormetan ile (3x30 mL) ile ekstrakte edilmiştir. Organik kısım, $MgSO_4$ üzerinde kurutulmuş, süzölmüş ve konsantre edilmiştir. BOD-Z-EN maddesi kolon kromatografisi tekniği ile saflaştırılmıştır.



Şekil 3.1. BOD-Z-EN bileşiğinin kimyasal sentezi

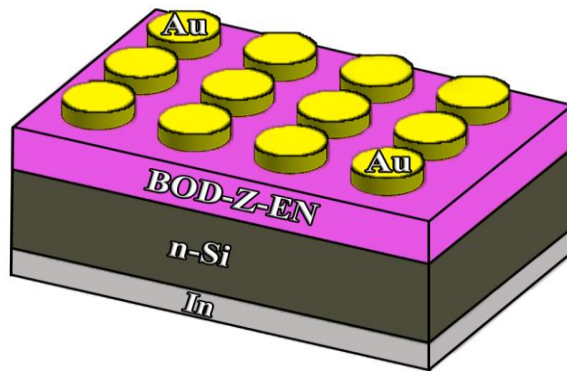
3.1.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi

Bu çalışmada, kullanılan n tipi silisyum kristali, oksit tabakayı kaldırmak ve kristalin üzerinde bulunan kiri temizlemek için kimyasal temizleme işlemi yapılmıştır. Silisyum kristalinin temizleme işlemi;

- İlk olarak trikloretilen ile 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
- Ultrasonik yıkama işleminin ardından 5 dakika boyunca deiyonize su ile temizlenmiştir.
- Ardından alkol ile ultrasonik olarak 5 dakika yıkanmıştır.
- Alkolle yıkama işleminden sonra tekrar deiyonize su ile 5 dakika temizlenmiştir.
- Daha sonra aseton ile ultrasonik olarak 5 dakika yıkanmıştır.
- Aseton ile yıkama işleminden sonra tekrar deiyonize su ile 5 dakika temizlenmiştir.
- Bu işlemin ardından 1:10 HF çözeltisinde 5 dakika temizlenmiştir.
- Bu işlemin ardından kristal yine deiyonize su ile 5 dakika yıkanmıştır.
- Son olarak Si kristali kuru azot ile kurutulmuştur.

3.1.3. BOD-Z-EN Organik Arayüzey Tabakalı Schottky Diyotunun Hazırlanması

Silisyum kristalinin kimyasal temizleme işlemi tamamlandıktan sonra silisyum kristalinin mat yüzeyine Nanovak marka termal buharlaştırma cihazı ile 100 nm kalınlığında %99,999 saflıkta İndiyum metali buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma işleminin ardından OTF – 1200X marka fırında, 350 C° sıcaklıkta, 30 saniye boyunca vakum ortamında tavlınmıştır. Daha sonra tekrar termal buharlaştırma cihazı ile indiyum (In, %99,999) metali 100 nm daha buharlaştırılmıştır ve böylece diyotun omik kontak kısmı oluşturulmuştur. Omik kontak oluşturulduktan sonra, BOD-Z-EN organik yarıiletkeni kloroform çözücüsünde çözülüp spin kaplama cihazı ile silisyum kristalinin parlak yüzeyine BOD-Z-EN ince filmi büyütülerek kurutulmaya bırakılmıştır. Bu kalınlık yüksek frekanslardaki kapasite – voltaj ölçümünden hesaplanmıştır. Spin kaplama işlemi, ilk 30 saniye 500 rpm hızda, daha sonraki 30 saniye ise 1200 rpm hızda gerçekleştirilmiştir. Spin kaplama yönteminin ardından organik yarıiletkenin kaplanmış yüzeyine 1 mm yarıçaplı metal maske yerleştirilmiştir. 1 mm yarıçaplı Altın metali termal buharlaştırma cihazı 150 nm kaplanmış ve bu kaplama ile doğrultucu kontak oluşturulmuştur. (Buharlaştırma işlemleri yaklaşık olarak 10^{-6} Torr basınçla yapılmıştır). Doğrultucu kontak oluşturulduktan sonra Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotu oluşturulmuştur (Şekil 3.2).



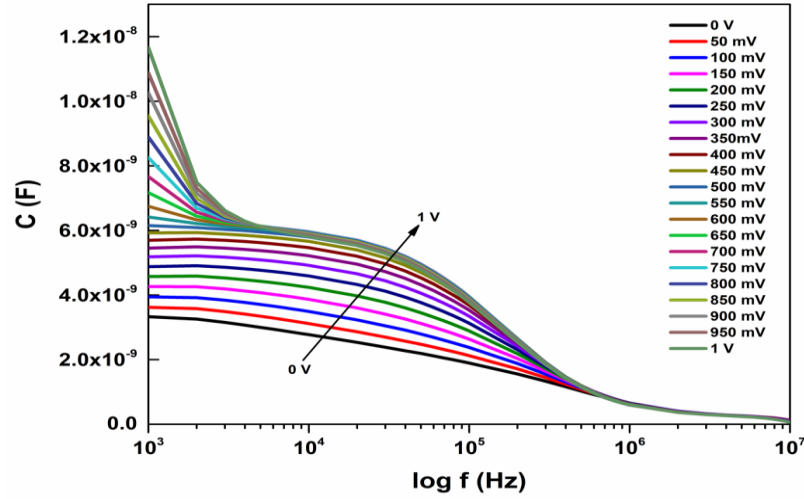
Şekil 3.2. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun şematik gösterimi

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky Diyotunun Farklı Voltajlarda Kapasite - Kondüktans - Frekans Karakteristikleri

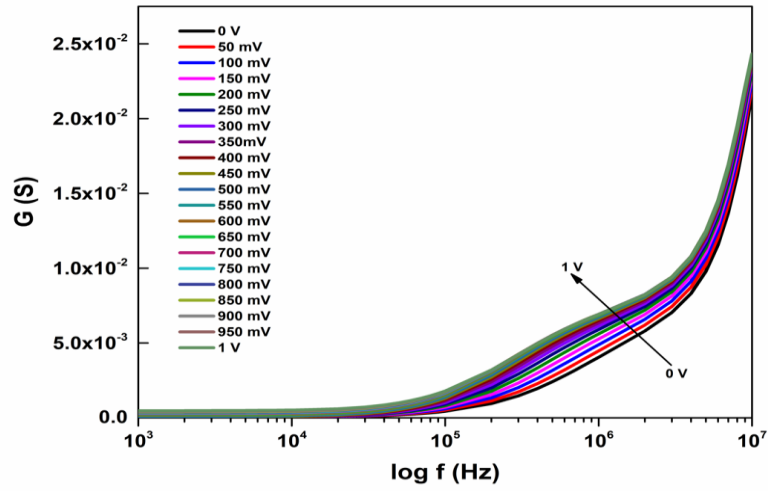
Hazırlanan Schottky diyotun C-f ölçümleri 0.0 V-1.0 V arasında 50 mV aralıklarla ve 1.0 kHz – 10 MHz frekans aralığında yapılmıştır. Şekil 4.1, hazırlanan Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotun ölçülen kapasite değerlerinin frekansın fonksiyonu olarak çizilen C-f eğrilerini göstermektedir.

Şekil 4.1’de kapasite değerinin voltaj değeri ile arttığı görülmektedir ve bu durum üretilen diyotun MOS tipi bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, 0.0 V da ölçülen kapasite değeri $3,32 \times 10^{-9}$ F iken 1.0 V da ölçülen kapasite değeri $1,16 \times 10^{-8}$ F’ye artmıştır. Yine Şekil 4.1’de görüldüğü gibi artan frekans değerleriyle birlikte kapasite değerleri azalmaktadır. Örneğin, 0.0 V için, 1 kHz de kapasite değeri $3,32 \times 10^{-9}$ F iken 1 MHz de kapasite değeri $6,49 \times 10^{-10}$ F a azalmıştır. Bu davranış, düşük frekanslarda arayüzey durumlarının uygulanan AC sinyali takip edebilmesi ve yüksek frekanslarda ise takip edememesi ile açıklanabilir. Bu nedenle, yüksek frekanslarda arayüzey durumlarından kapasitansa ve kondüktansa önemli bir katkı gelmemektedir.



Şekil 4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotun 0.0 V-1.0 V aralığındaki kapasite-frekans grafiği

Hazırlanan Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun G-f ölçümleri 0.0 V-1.0 V arasında 50 mV aralıklarla 1.0 kHz -10 MHz frekans aralığında yapılmıştır. Şekil 4.2, hazırlanan Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotun ölçülen kondüktans değerlerinin frekansın fonksiyonu olarak çizilen G-f eğrilerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi voltaj değeri arttıkça kondüktans değeri de artmaktadır ve bu durum üretilen diyotun MOS tipi bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. 1.0 kHz -100 kHz frekans aralığında kondüktans değerinin yavaş arttığı, 100 kHz den sonra ise hızlı bir artış olduğu görülmektedir. 10^3 Hz için, 0.0 V da ölçülen kondüktans değeri $2,31 \times 10^{-6}$ S iken 1.0 V da ölçülen $0,46 \times 10^{-3}$ S e yükselmiştir. 0.0 V için, 1.0 kHz de kondüktans değeri $2,31 \times 10^{-6}$ S iken 1.0 MHz de kondüktans değeri 0,00404 S'e düşmüştür.



Şekil 4.2. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotun 0.0 V-1.0 V aralığındaki kondüktans-frekans grafiği

4.2. Nicolian and Goetzberger Metodu ile Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotunun Seri Direnç Değerlerinin Hesaplanması

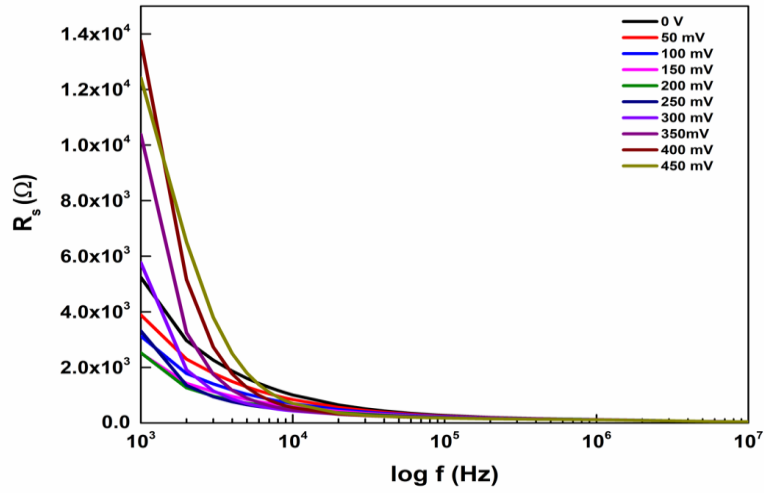
Bu tez kapsamında hazırlanan Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotun seri direnç (R_s) değerlerini Nicolian ve Goetzberger metodu yardımıyla hesaplanmıştır. Yığılım, tükenim ve tersinim bölgelerinde elde edilen kapasite ve kondüktans değerlerinin seri direnç ile ilişkisini ortaya koyan bu metod Denklem 4.1'deki gibi ifade edilir [28];

$$R_s = \frac{G}{G^2 + (\omega C)^2} \quad (4.1)$$

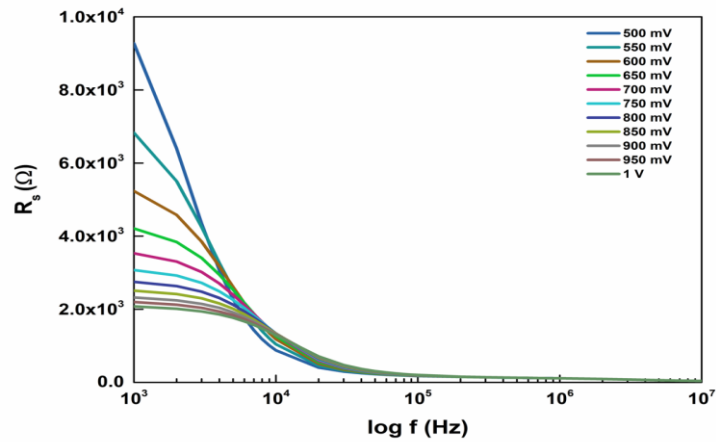
Burada $\omega = 2\pi f$ olarak alınırken, C ve G ise sırasıyla yığılım, tükenim ve tersinim bölgelerinde ölçülen kapasite ve kondüktans değerleridir.

Denklem 4.11 kullanılarak Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0 V - 450 mV aralığında hesaplanan R_s -f grafiği Şekil 4.3 te gösterilmiştir. Aynı şekilde 500 mV - 1.0 V aralığında hesaplanan R_s -f grafiği ise Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'e göre ölçülen tüm voltaj değerleri için frekans değerinin artmasıyla seri

direnç değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum oksit/yarıiletken arayüzeyinde yer alan arayüzey durum yoğunluğu ile açıklanabilir. Örneğin, 1 kHz de (0.0 V için) R_s değeri 5236,75 Ω iken, 1.0 MHz de (0.0 V için) R_s değeri 122,51 Ω a düşmüştür. Bu davranış, düşük frekanslarda arayüzey durumlarının uygulanan AC sinyali takip edebilmesi ve yüksek frekanslarda ise takip edememesi ile açıklanabilir. Bu nedenle, yüksek frekanslarda seri direncin kapasitansa ve kondüktansa önemli bir katkısının olmadığı söylenebilir. Örneğin, 1 kHz de (0.0 V için) R_s değeri 5236,75 Ω iken, 1.0 MHz de (0.0 V için) R_s değeri 122,51 Ω a düşmüştür. 1 kHz de (0.0 V için) R_s değeri 5236,75 Ω iken, 1 kHz de (0.45 V için) R_s değeri 1241,22 Ω a düşmüştür.



Şekil 4.3. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0 V-450 mV aralığındaki R_s -f grafiği



Şekil 4.4. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 500 mV-1 V aralığındaki R_s -f grafiği

4.3. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotunun Farklı Voltajlarda C_c -f ve G_c -f Değişim Eğrileri

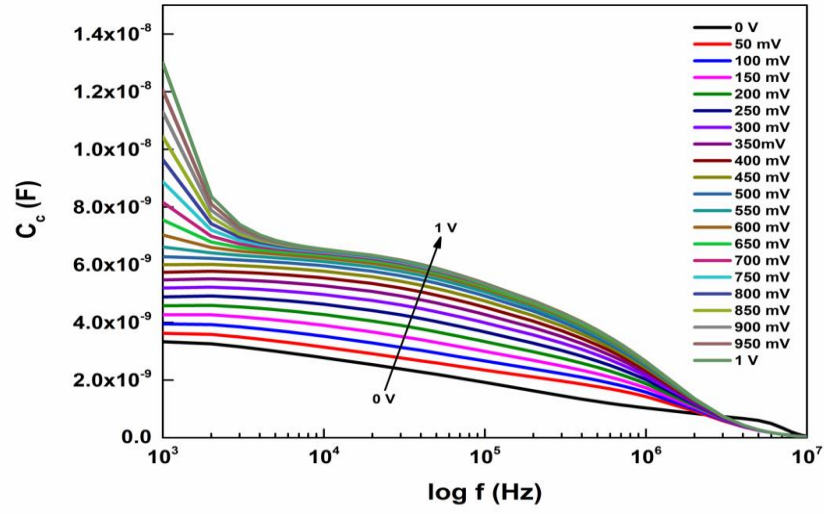
Şekil 4.3 ve 4.4 incelendiğinde 10^3 - 10^5 Hz frekans aralığında hesaplanan R_s değerlerinin kapasitans (C_m) ve kondüktans (G_m) değerlerine önemli ölçüde katkısının olduğu görülmektedir. Bu nedenle daha güvenilir sonuçlar elde etmek için diyotun seri direnç etkisinden arındırılmış gerçek kapasitans (C_c) ve gerçek kondüktans (G_c) değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için denklem (4.2), (4.3) ve (4.4) kullanılarak seri direnç etkisinden arındırılmış C_c ve G_c değerleri hesaplanmıştır. C_c ve G_c değerlerinin farklı voltajlar için frekansa bağlı değişimleri Şekil 4.5 ve 4.6 da gösterilmiştir.

$$C_c = \frac{(G_m + w^2 C_m^2) C_m}{a^2 + w^2 C_m^2} \quad (4.2)$$

$$G_c = \frac{(G_c^2 w^2 C_m^2) a}{a^2 + w^2 C_m^2} \quad (4.3)$$

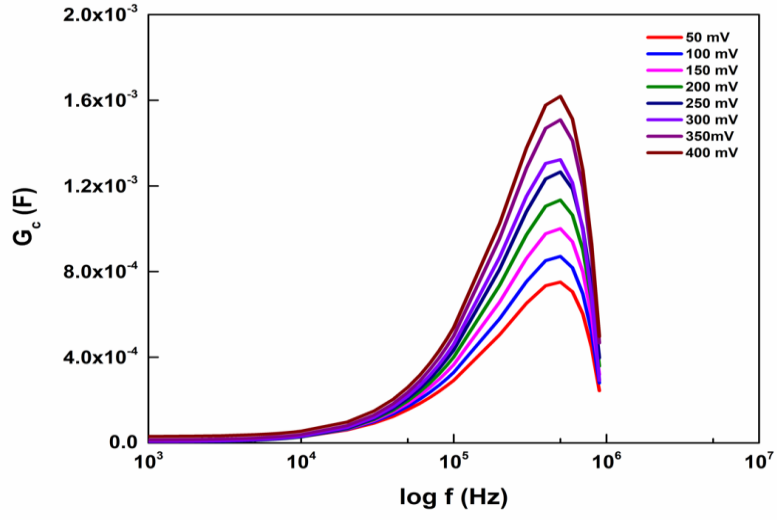
$$a = G_m - (G_m^2 + w^2 C_m^2) \times R_s \quad (4.4)$$

Şekil 4.5 ve 4.6’da görüldüğü gibi özellikle doğru öngerilim altında düzeltilmiş kapasitans ve kondüktans eğrileri seri dirençten önemli ölçüde etkilenmişlerdir. Şekil 4.1 ve 4.5 karşılaştırıldığında ölçülen kapasite değeri (C_m) ile düzeltilmiş kapasite (C_c) değerlerinin seri direnç etkisinden dolayı farklı olduğu görülmektedir. Örneğin; 1 MHz de (0.0 V için) C_m değeri $6,49 \times 10^{-10}$ F iken seri dirençten arındırılmış C_c değerinin $1,03 \times 10^{-9}$ F olduğu belirlenmiştir. Yine 1 MHz de (1.0 V için) C_m değeri $5,92 \times 10^{-11}$ F iken seri dirençten arındırılmış C_c değerinin $2,63 \times 10^{-9}$ F olduğu belirlenmiştir. Seri direncin etkisinden arındırılmış bir durumda yük taşıyıcılarının daha rahat hareket edebilmesi nedeniyle düzeltilmiş kapasite değerlerinde görülen bu davranış bir MOS yapısı davranışıyla benzerlik göstermektedir.

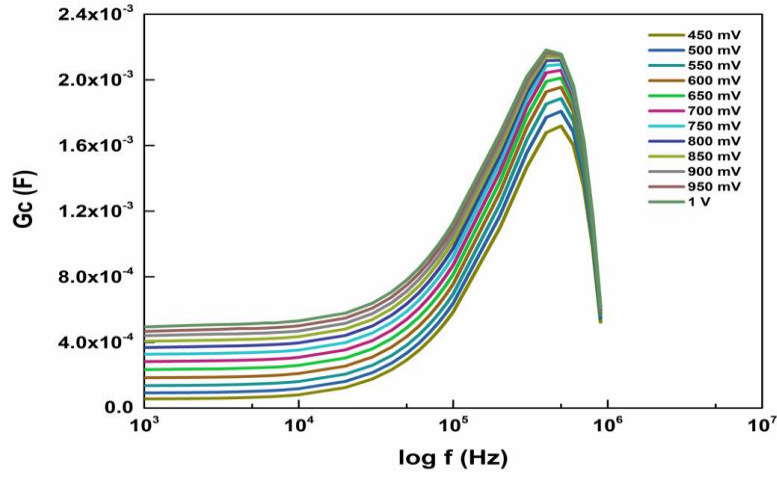


Şekil 4.5. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V-1.0 V aralığındaki C_c -f grafiği

Bunun tersine Şekil 4.6' da verilen düzeltilmiş kondüktas (G_c) değerlerinin uygulanan gerilimle arttığı görülmektedir. Örneğin; 1 kHz de (0.0 V için) G_c değeri $2,26 \times 10^{-6}$ F iken 1 kHz de (450 mV için) G_c değeri $5,59 \times 10^{-5}$ F, ve 0.0 V için (1 kHz) $2,26 \times 10^{-6}$ F iken 0.0 V için (1 mHz) de $3,23 \times 10^{-3}$ F bulunmuştur. Şekil 4.6'da düzeltilmiş kapasitans eğrilerinin pik verdiği görülmektedir ve bu pik oksit/yarıiletken arayüzeyindeki yük taşıyıcılarının dağılımından ileri gelmektedir.



Şekil 4.6. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 50.0 mV-400.0 mV aralığındaki G_c -f grafiği



Şekil 4.7. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 450.0 mV-1.0 V aralığındaki G_c -f grafiği

4.4. Organik Arayüzey Tabakası Kalınlık Hesaplanması

Doğrultucu kontak ile yarıiletken kristal arasına büyütülmüş olan organik arayüzey tabakasının kalınlığı denklem 4.5'te verilen eşitlikten yararlanarak bulunmuştur [30, 31].

$$d = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{C_c} \quad (4.5)$$

Bu denklemde ϵ' arayüzey tabakasının dielektrik sabitini, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini, d organik arayüzey tabakası kalınlığını ve A ise etkin yüzey alanını ifade etmektedir. C_c ise 1 MHz de (0.0 V için) düzeltilmiş kapasite değeridir ($1,0313 \times 10^{-9}$ F). BOD-Z-EN bileşiğinin dielektrik sabiti DFT metodu yardımıyla hesaplanmış ve 3,628 bulunmuştur [41].

Denklem 4.5 için $\epsilon'=3,628$, $\epsilon_0=8,854 \times 10^{-12}$ F/m, $A=0,0314$ ve $C_c=1,0313 \times 10^{-9}$ F değerleri kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun arayüzey tabakasının kalınlığı 97.8 nm bulunmuştur.

4.5. Kondüktans (G_p/w -log f) Yöntemi ile Arayüzey Durumlarının Hesaplanması

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun arayüzey durum yoğunluğu kapasitans spektroskopisi yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu yöntem paralel kondüktans (G_p/w) değerlerinin frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülmesi esasına dayanmaktadır ve şu şekilde ifade edilir;

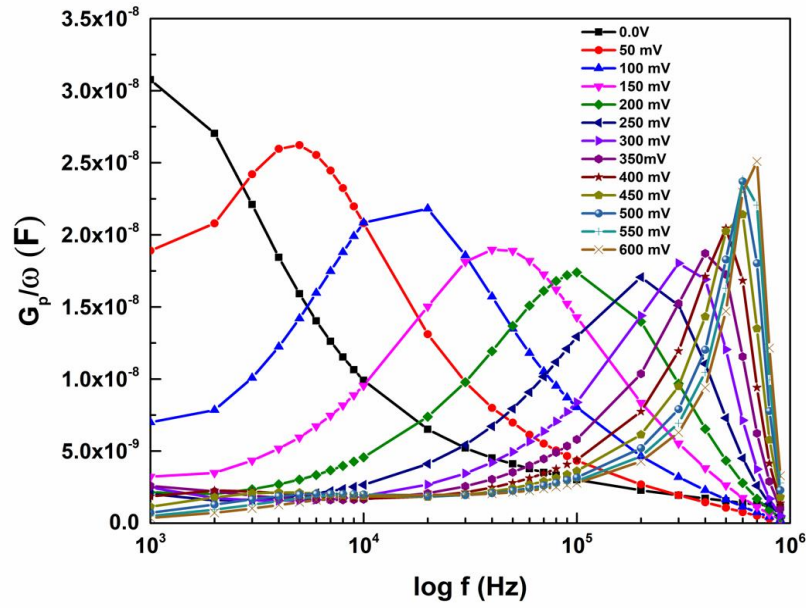
$$\frac{G_p}{w} = \frac{wC_{ox}^2 G_m}{G_m^2 + w^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad (4.6)$$

Bu denklemde G_m ölçülen kondüktans değeri, C_m : ölçülen kapasitans değeri, C_{ox} oksidin kapasitans değeri ve w ise açısal frekanstır.

(G_p/w) değerlerinin farklı voltajlar altındaki frekansa bağlı değişimlerini gösteren eğriler Şekil 4.8'de gösterilmiştir. $[\partial(G_p/w)]/\partial(wt)=0$ olması durumunda paralel kondüktans eğrilerinde oluşması beklenen pikler beklenildiği gibi Şekil 4.8'de görülmüştür. Bu piklere karşılık gelen G_p/w ve f_{pik} değerleri bulunmuş ve denklem 4.7 ve 4.8 de yerine konularak yardımıyla arayüzey durum yoğunluğu (D_{it}) ve taşıyıcı ömrü (τ) değerleri hesaplanmıştır.

$$D_{it} = \frac{(G_p/w)}{0.4qS} \quad (4.7)$$

$$\tau = \frac{1,98}{w} \quad (4.8)$$



Şekil 4.8. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V 600.0 mV aralığındaki G_p/w -log f grafiği

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan (G_p/w), D_{it} ve τ değerleri Tablo 4.1 de gösterilmiştir.

Tabloda görüldüğü gibi voltaj değeri arttıkça taşıyıcı ömrü (τ) değeri azalmaktadır. 0.0 V da taşıyıcı ömrü (τ) değeri 3000×10^{-7} iken 1.0 V da $4,5 \times 10^{-7}$ ye düşmüştür. Arayüzey durum yoğunluğu (D_{it}) değerleri $0,84 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ile $1,53 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değişen değerler olarak hesaplanmıştır. Ayrıca tabloda arayüzey durum yoğunluğu (D_{it}) değerlerinin daha yüksek voltajdaki artışı görülmektedir. Bu davranışın nedeni G_p/w nin tepe değerlerinin azalması olarak açıklanabilir.

Tablo 4.1. V, f_{pik} , G_p/w , D_{it} ve τ değerleri

Voltage (V) $\times 10^{-1}$)	f_{pik} (Hz) $(\times 10^3)$	G_p/w (F) $(\times 10^{-8})$	$D_{\text{it}}(\text{V}^{-1}\text{cm}^{-2})$ $(\times 10^{13})$	τ $(\times 10^{-7})$
0.0	1	3,08	1,53	3000
0.5	5	2,62	1,30	630
1.0	20	2,18	1,09	157
1.5	40	1,90	0,94	78
2.0	90	1,72	0,85	35
2.5	200	1,71	0,84	15
3.0	300	1,80	0,89	10
3.5	400	1,87	0,93	7,88
4.0	500	2,05	1,02	6,30
4.5	600	2,14	1,07	5,25
5.0	600	2,37	1,18	5,25
5.5	600	2,38	1,19	5,25
6.0	700	2,51	1,25	4,50
6.5	700	2,70	1,34	4,50
7.0	700	2,80	1,39	4,50
7.5	700	2,85	1,42	4,50
8.0	700	2,86	1,42	4,50
8.5	700	2,85	1,42	4,50
9.0	700	2,84	1,41	4,50
9.5	700	2,81	1,40	4,50
1.0	700	2,78	1,38	4,50

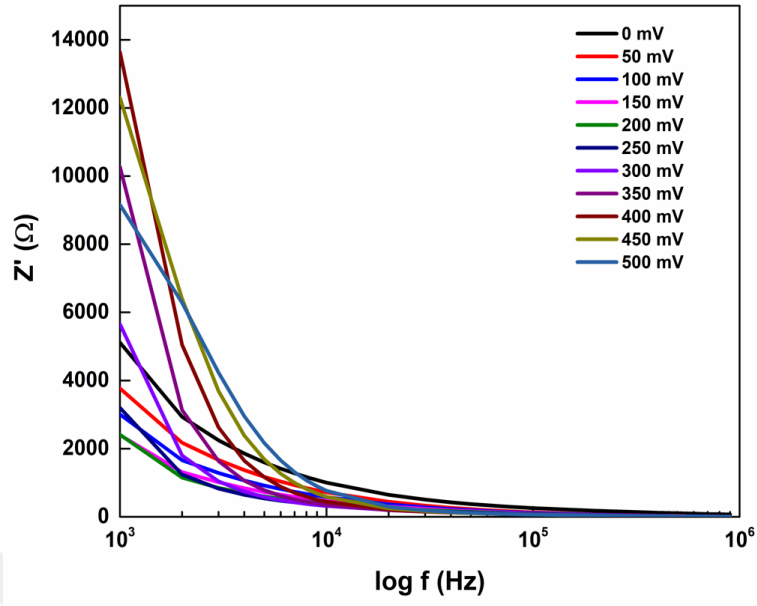
4.6. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotuna ait Empedans Ölçümleri

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotunun empedans hesaplamaları denklem 4.9 ve 4.10 (Empedans Spektroskopisi yöntemi) ile yapılmıştır.

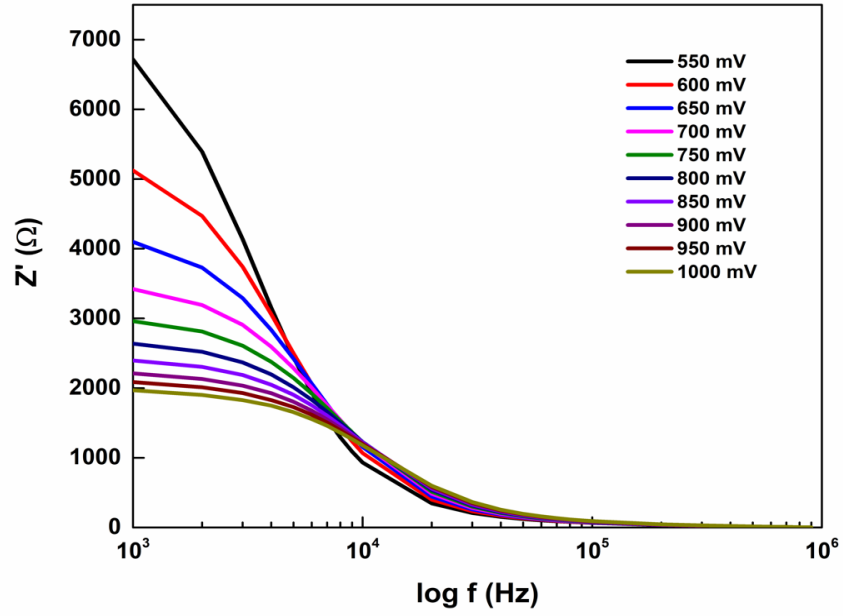
$$Z' = \frac{G}{G^2 + \omega^2 C^2} \quad (4.9)$$

$$Z'' = \frac{C}{G^2 + \omega^2 C^2} \quad (4.10)$$

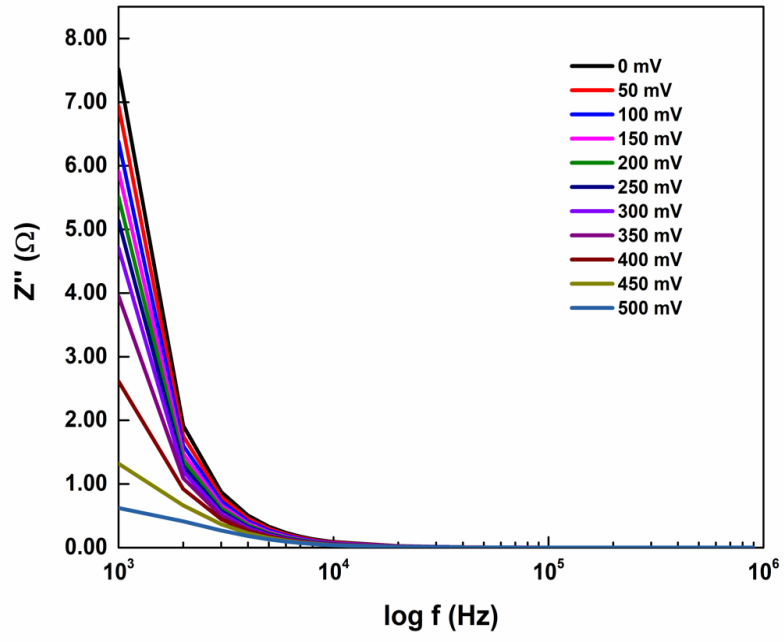
Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotunun farklı gerilimler altında gerçek empedans-frekans (Z' -f) eğrileri Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, üretilen diyotun gerçek empedans değerleri artan frekans ile azalmaktadır. Bu davranış, arayüzey durumlarının varlığına atfedilebilir. Başka bir deyişle, artan frekans değeriyle arayüzey durumlarının AC sinyali takip edememesi sonucunda yapının gövde (bulk) direnci azalır, yani empedans azalır. Benzer şekilde Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotunun farklı gerilimler altında hayali empedans-frekans (Z'' -f) eğrileri Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, üretilen diyotun hayali empedans değerleri artan frekans ile azalmaktadır. Gerçek empedans için yapılan açıklamalar hayali empedans içinde geçerlidir.



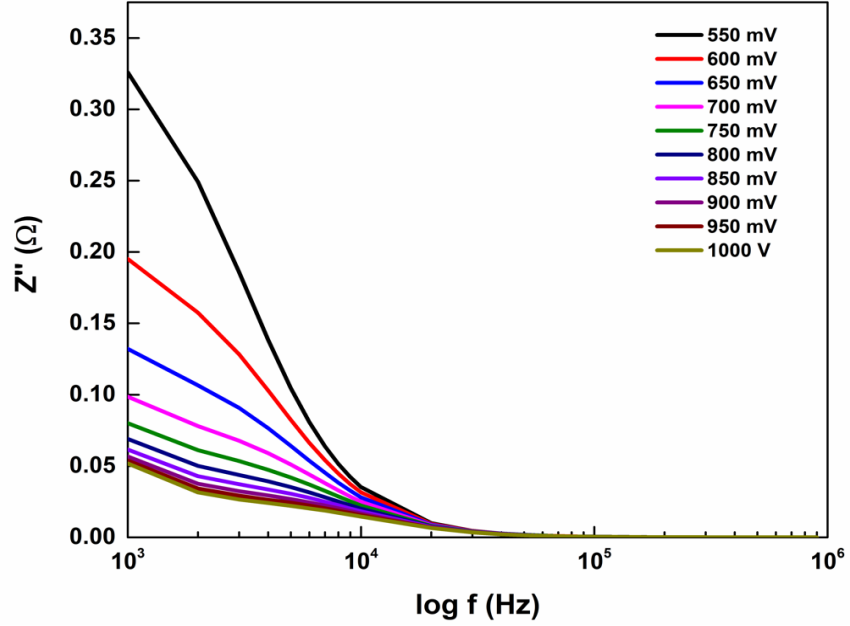
Şekil 4.9. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 mV -500 mV aralığındaki Z' -log f grafiği



Şekil 4.10. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 550 mV-1000 mV aralığındaki Z' - log f grafiği



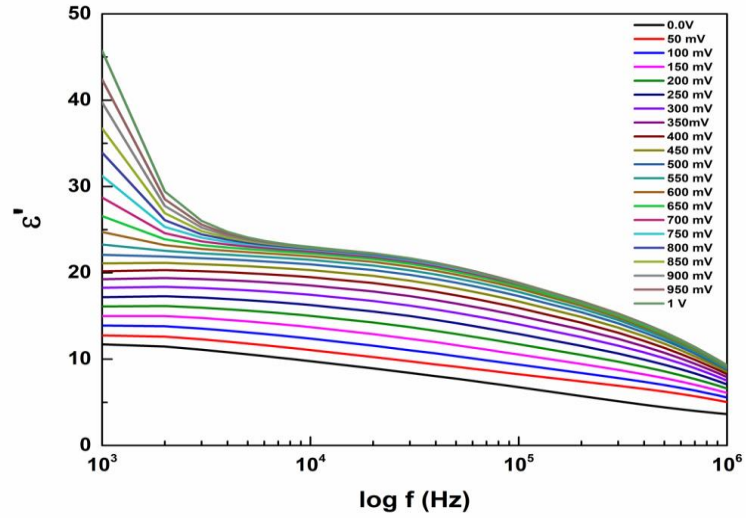
Şekil 4.11. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 mV -500 mV aralığındaki Z'' - $\log f$ grafiği



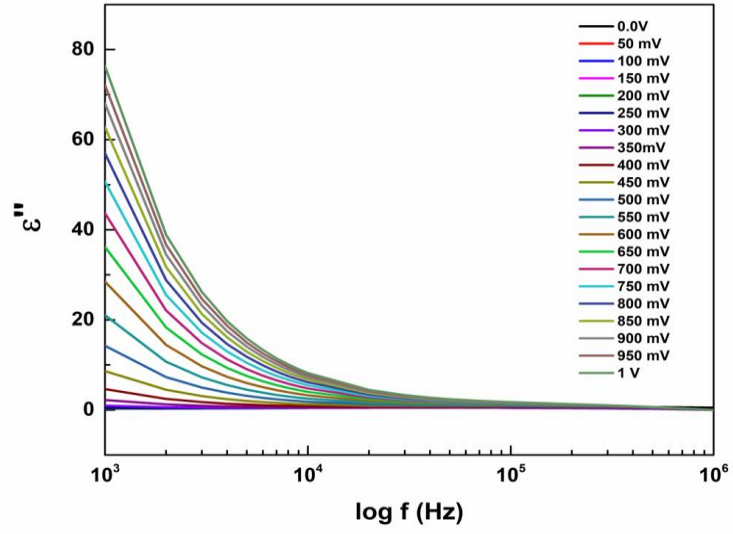
Şekil 4.12. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 550.0 mV -1000 V aralığındaki Z'' - $\log f$ grafiği

4.7. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotunun Dielektrik özelliklerinin incelenmesi

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotunun hesaplanan dielektrik sabiti (ϵ') ve dielektrik kayıp (ϵ'') değerlerinin frekans ile değişim eğrileri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, ϵ' ve ϵ'' değerleri artan frekans ile azalmaktadır ve yüksek frekanslarda neredeyse sabit kalmaktadır. Bu sonuç, arayüzey dipollerinin uygulanan alternatif alan doğrultusundaki yönelimlerinin artan frekans ile azalması ile açıklanabilir. Yani, düşük frekanslarda, dipoller AC elektrik alanının frekansını takip edebilir. Ancak, frekans artarken, dipoller dış alan değişikliklerine ayak uyduramaz ve böylece dielektrik sabiti azalır.

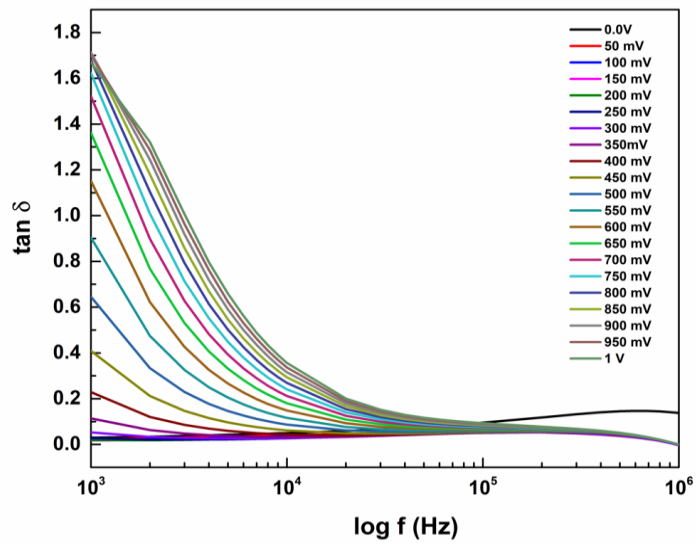


Şekil 4.13. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V-1 V aralığındaki ϵ' -log f grafiği



Şekil 4.14. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V-1 V aralığındaki ϵ'' -log f grafiği

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotunun hesaplanan dielektrik kayıp tanjant ($\tan \delta$) değerinin frekans ile değişim eğrisi Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kayıp tanjant artan frekansla birlikte azalmaktadır ve yaklaşık 100 kHz frekans değerinden sonra ise sabit kalmaktadır. Bu davranış tipik MOS yapının davranışına benzemektedir.



Şekil 4.15. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 0.0 V-1 V aralığındaki $\tan \delta$ -log f grafiği

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, öncelikle BOD-Z-EN organik bileşiği sentezlenmiş ve karakterize edilmiştir. Fosfor (P) katkılı n tipi bir silisyum kristali kullanılarak BOD-Z-EN arayüzey tabakalı Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotu elde edilmiştir. Elde edilen Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun frekansa bağlı kapasitans-frekans (C-f) ve kondüktans-frekans (G-f) karakteristikleri, seri direnç (R_s), düzeltilmiş kapasitans (C_c), düzeltilmiş kondüktans (G_c), kapasitans ölçümleri (G_p/w), empedans ölçümleri (Z'') ve dielektrik özellikleri (ϵ') incelenmiştir.

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun frekansa bağlı kapasitans-frekans (C-f) ve kondüktans-frekans (G-f) ölçümleri sonucunda voltaj değeri arttıkça kapasite ve kondüktans değerinin de arttığı, artan frekans değerleriyle birlikte kapasite değerlerinin de azaldığı ve kondüktans değerinin arttığı görülmüştür. Bu davranışın nedeninin düşük frekanslarda arayüzey durumlarının uygulanan AC sinyali takip edebilmesi ve yüksek frekanslarda ise takip edememesi olarak açıklanmıştır.

Frekans değerinin artmasıyla seri direnç (R_s) değerinin azaldığı hesaplanmış; düzeltilmiş kapasite ve kondüktans değerlerinin ise seri dirençten önemli ölçüde etkilendiği alınan ölçüm sonuçları karşılaştırılarak belirlenmiştir.

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun arayüzey durumlarının varlığı kapasitans spektroskopisi yöntemiyle belirlenmiştir. Arayüzey durum yoğunluğu (D_{it})

değerlerinin $0,84 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ile $1,53 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değiştiği belirlenmiştir.

Empedans spektroskopisi yöntemiyle elde edilen sonuçlara göre ise frekans değeri arttıkça empedans değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durum arayüzey durumlarının varlığını göstermiştir.

Dielektrik hesaplamalarda elde edilen sonuçlarda frekans değerinin artmasıyla ϵ' ϵ'' ve $\tan \delta$ değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu davranışlar tipik MOS yapının davranışına benzemektedir.

Tüm bu sonuçlar bu tez çalışmasında üretilen Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky tipi diyotun bir MOS tipi kapasitör gibi davrandığını ve enerji depolayabilen bir aygıt olabileceğini ortaya koymaktadır. BOD-Z-EN gibi BODIPY türevi olan farklı bileşiklerin elektronik ve optoelektronik gibi aygıt uygulamalarında arayüzey tabakası olarak kullanılabileceği yine bu tez çalışmasında gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, 2. Baskı, John Wiley&Sons, New York, 1982.
- [2] Sharma, B.L., Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications, NY: Springer, New York, 2013.
- [3] Al-Ahmadi, N.A., Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: A review of recent advances, Mater. Res. Express, 7(3), 032001, 2020.
- [4] Rhoderick, E.H., Williams, R.H., Metal-Semiconductor Contacts, 2. Baskı, Claredon Yayınevi, Oxford, 1980.
- [5] Turut, A., On current-voltage and capacitance-voltage characteristics of metal-semiconductor contacts, Turk. J. Phys., 44(7), 302-347, 2020.
- [6] Tung, T., Recent Advances in Schottky Barrier Concepts, Mater. Sci. Eng. R: Reports, 35, 1-138, 2001.
- [7] Ligenza, S., Mechanisms for Silicon Oxidation in Steam and Oxygen, J. Phys. Chem. Solids, 131-136, 1960.
- [8] Tuğluoğlu, N., Koralay, H., Akgül, K.B., Çavdar, Ş., Detailed Analysis of Device Parameters by Means of Different Techniques in Schottky Devices, J. Electron. Mater., 45, 3859-3865. 2016.

- [9] Eymur, S., Tugluoglu, N., Apaydin, A., Akın, U., Yüksel, O.F., Illumination Dependent Electrical and Photovoltaic Properties of Au/n-Type Si Schottky Diode with Anthracene-Based NAMA Interlayer, ECS J. Solid. State. Sci. Technol., 10(5), 051001, 2021.
- [10] Karadeniz, S., Barış, B., Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., Analysis of electrical properties of Al/p-Si Schottky contacts with and without rubrene layer, Synth. Met., 168, 16-22, 2013.
- [11] Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., Şafak, H., Karadeniz, S., The Double Gaussian Distribution of Inhomogeneous Barrier Heights in the Organic-Inorganic Schottky Devices, Phys. Status Solidi A, 209, 2313-2316, 2012.
- [12] Caironi, M., Noh, Y.Y., Large Area and Flexible Electronics, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.
- [13] Lee, C.P., Li, C.T., Ho, K.C., Use of Organic Materials in dye-sensitized Solar Cells, Mater. Today, 20, 267-283, 2017.
- [14] Ogawa, S., Organic Electronics Materials and Devices, Tokyo: Springer Japan, 2015.
- [15] Squeo, B.M., Ganzer, L., Virgili, T., Pasini, M., BODIPY-Based Molecules, a Platform for Photonic and Solar Cells, Molecules, 26(1), 153-183, 2021.
- [16] Poddar, M., Misra, R., Recent advances of BODIPY based derivatives for optoelectronic applications, Coord. Chem. Rev., 421, 213462-213483, 2020.
- [17] Ho, D., Ozdemir, R., Kim, H., Earmme, T., Usta, H., Kim, C., BODIPY-Based Semiconducting Materials for Organic Bulk Heterojunction Photovoltaics and Thin-Film Transistors, ChemPlusChem, 84(1), 18-37, 2019.

- [18] Squeo, B.M., Pasini, M., BODIPY platform: a tunable tool for green to NIR OLEDs, *Supramol. Chem.*, 32(1), 56-70, 2019.
- [19] Maloi, S.J., McPherson, M., Capacitance–voltage behaviour of Schottky diodes fabricated on p-type silicon for radiation-hard detectors, *Radiat. Phys. Chem.*, 85, 73-82, 2013.
- [20] Ho, P.S., Yang E.S., Evans, H.L., Wu, X., Electronic states at silicide-silicon interfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 56(2), 177-180, 1986.
- [21] Werner, J., Levi, A.F.J., Tung, R.T., Anzlowar, M., Pinto, M., Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts, *Phys. Rev. Lett.*, 60(1), 53-56, 1988.
- [22] Hahn, B.R., Yoon, D.Y., Electrical and interfacial properties of metalpolyamide- silicon structure. *J. Appl. Phys.*, 65(7), 2766-2771, 1989.
- [23] Terman, L.M., An investigation of surface states at a silicon/silicon oxide interface employing metal-oxide-silicon diodes, *Solid-State Electron.*, 5, 285-299, 1962.
- [24] Nicollian, E.H., Brews, J.R., *MOS Physics and Technology*. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [25] Grove A.S. *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [26] Yakuphanoglu, F., Farooq Aslam, W. Organic-inorganic photosensor controlled by frequency based on nanostructure 1,4-diaminoanthraquinone and p-silicon, *Synth. Met.*, 161, 324-329, 2011.

- [27] Norde, H. Modified forward I-V plot for schottky diodes with high series resistance, J. Appl. Phys., 50, 5052-5054, 1979.
- [28] Nicollian, E.H., Goetzberger, A., Temperature dependent of inversion layer frequency response in Silicon, Bell. Syst. Tech. J., 46, 513-522, 1966.
- [29] Cheung, S., Cheung, N., Extraction of Schottky Diode Parameters From Forward Current-Voltage Characteristics, Appl. Phys. Lett., 49,85-87, 1986.
- [30] Popescu, M., Bunget, I., Physics of Solid Dielectrics. Elsevier, Amsterdam, 1984.
- [31] Raju, G.G., Dielectrics in Electric Fields. 2. Baskı, CRC Press, Boca Raton, 2017.
- [32] Hoque, M.M., Dutta, A., Kumar, S., Sinha, T.P., J. Mater. Sci. Technol. 30(4), 311-320, 2014.
- [33] Sutar, B.C., Choudhary, R.N.P., Das, P.R., Ceram. Int. 40(6), 7791-7798, 2014.
- [34] Zamora, M., Reeves, G.K., Gazeckia, G., Mi, J., Yang, C.Y., Solid-State Electron. 43(4), 801-808, 1999.
- [35] Bi-Xin, L., Jiang-Shan, C., Yong-Biao, Z., Dong-Ge, M., Frequency-dependent electrical transport properties of 4,4',4'-tri(N-carbazolyl)-triphenylamine investigated by impedance spectroscopy, Chin. Phys. Lett., 28, 057201, 2011.
- [36] Treibs, A. ve Kreuzer, F.-H., Difluorboryl-Komplexe von Di- und Tripyrrylmethenen, Liebigs. Ann. Chem., 718, 208-223, 1968.
- [37] Loudet, A., Burgess, K., BODIPY Dyes and Their Derivatives: Syntheses and Spectroscopic Properties, Chem. Rev., 107, 4891, 2007.

[38] Poddar, M., Misra, R., Recent advances of BODIPY based derivatives for optoelectronic applications, *Coord. Chem. Rev.*, 421 (22), 2020.

[39] Ho, D., Ozdemir, R., Kim, H., Earmme, T., Usta, H., Kim, C., BODIPY-based Semiconducting materials for organic bulk heterojunction photovoltaics and thin-film transistors, *Chempluschem.*, 84, 18-47, 2019.

[40] Üçüncü, M., Karakuş, E., Emrullahoğlu, M., A BODIPY-based fluorescent probe for ratiometric detection of gold ions: utilization of Z-enynol as the reactive unit, *Chem. Comm.*, 52, 8247-8250, 2016.

[41] Tezcan, A.O., Eymur, S., Taşcı, E., Emrullahoğlu, M., Tuğluoğlu, N., Investigation of electrical and photovoltaic properties of Au/n-Si Schottky diode with BOD-Z-EN interlayer, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 32, 12513-12520, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, Orta ve Lise eğitimini Ordu'da tamamladı. 2012 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümüne yerleşti ve 2016 yılında mezun oldu. 2019 yılında Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

